



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA PRODUCCIÓN VÍA
SÓLIDA DE MATERIALES COMPUESTOS MATRIZ METÁLICA
EMPLEANDO RESIDUOS DE ALUMINIO COMO MATRIZ**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA

LUIGI BRYAN HERNÁNDEZ REYES

CDMX

2023





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: JOSE ALEJANDRO GARCIA HINOJOSA**

VOCAL: **Profesor: BALBINA OJEDA RAMIREZ**

SECRETARIO: **Profesor: MARIA GABRIELA GONZALEZ FLORES**

1er. SUPLENTE: **Profesor: JUAN CARLOS CONTRERAS GUZMAN**

2° SUPLENTE: **Profesor: JOSE MANUEL RAMIREZ HERRERA**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO DE FUNDICIÓN (ÁREA DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA) UBICADO EN EL EDIFICIO “D” DE LA FACULTAD DE QUÍMICA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA.

ASESOR DEL TEMA:

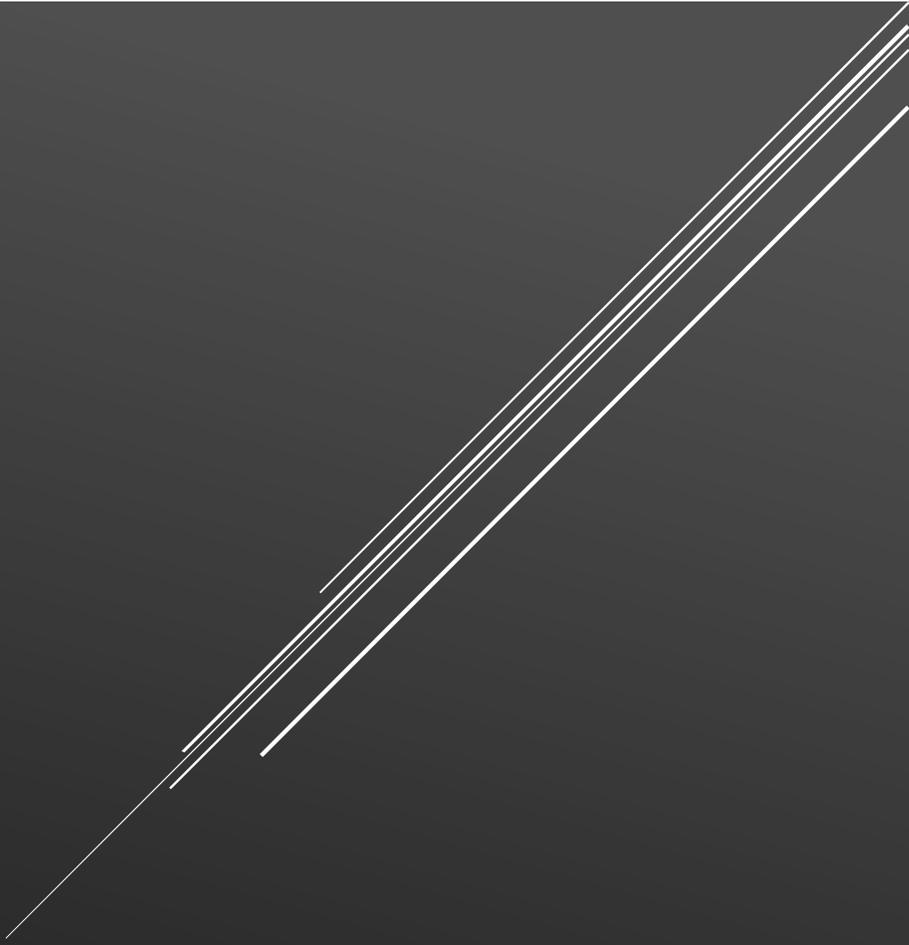
M. en I. MARÍA GABRIELA GONZÁLEZ FLORES

SUSTENTANTE (S):

LUIGI BRYAN HERNÁNDEZ REYES

Tabla de contenido

Capítulo I. Introducción.....	5
1.1 Reciclaje y aprovechamiento de residuos	5
1.2 Los residuos	6
1.2.1 Clasificación de residuos	7
1.3 Usos de los residuos en la fabricación de piezas metálicas	9
1.4 Materiales compuestos	10
1.4.1 Fabricación de materiales compuestos mediante pulvimetalurgia	11
1.4.1.1 Mezclado de polvos.....	12
1.4.1.2 Compactación de polvos	13
1.4.1.3 Sinterizado de polvos.....	14
Hipótesis	17
Objetivos.....	17
Metodología de trabajo	19
1. Preparación y limpieza de los residuos	20
2. Caracterización morfológica y/o microestructural de los residuos.....	23
3. Caracterización morfológica de los polvos cerámicos.....	24
4. Análisis químico de los residuos de aluminio y los polvos cerámicos.....	25
5. Fabricación del material compuesto.	25
5.1 Pruebas preliminares.....	25
5.2 Diseño factorial.....	27
5.3 Fabricación de los materiales compósitos.	29
6 Caracterización microestructural y química de los materiales compuestos.	30
7 Ensayo de laminación.....	31
Resultados.....	34
Conclusiones.....	80
Bibliografía.....	82
Anexos.....	87
Anexo A. Ejemplo de cálculos para la fabricación de probetas de residuos de aluminio con polvos cerámicos (SiC y WC).....	87
Anexo B. Diseño factorial.	88



INTRODUCCIÓN

Capítulo I. Introducción.

1.1 Reciclaje y aprovechamiento de residuos

La protección al ambiente representa uno de los mayores retos del presente en el ámbito nacional e internacional. Una de las áreas que causa cada vez más problemas en el país es el manejo y reciclaje de residuos industriales. El reciclaje de residuos metálicos no ferrosos tiene una serie de beneficios, entre los que destaca el potencial para reducir considerablemente la extracción de minerales vírgenes, preservando así, los recursos no renovables [1-3, 8, 9].

Actualmente se cuenta con dos principales procesos para reciclar los desechos de metales no ferrosos: fusión convencional y reciclaje en estado sólido. Al reciclaje por fusión se asocian una serie de problemas entre los que se incluyen una mayor pérdida de metal atribuida a la mayor reactividad química y a una mayor área de superficie específica de la viruta y/o polvos metálicos; gases tóxicos generados por la combustión del aceite adherido a la chatarra metálica; consumo de energía y costos relativamente más altos. Basado en la consideración integral de la eficiencia del reciclaje, el consumo de energía, los gastos y los impactos ambientales, el proceso de reciclaje en estado sólido se considera la opción más adecuada para las virutas metálicas. A partir de este proceso se puede convertir estos desechos en productos finales o semiproductos con propiedades mecánicas más elevadas sin recurrir a la fusión [4-6].

Existe un gran número de investigaciones enfocadas al reciclaje de virutas de metales no ferrosos (Mg, Ti, Cu, Al). Las técnicas aplicadas con éxito en el reciclaje de materiales monolíticos, recientemente se han aplicado para la fabricación de materiales compuestos en estado sólido [5-7]. A pesar de los resultados alentadores, aún no se han logrado eliminar ciertos defectos asociados al proceso de fabricación (aglomeración de partículas, huecos irregulares y presencia de poros producto de gases disueltos).

El presente trabajo expone rutas de fabricación vía sólida de materiales compuestos de matriz metálica empleando residuos de procesos metalmeccánicos obtenidos de tornos, fresadoras o cortadoras de sierra de cinta (rebabas y virutas de aluminio).

Estos residuos pueden ser una alternativa a emplearse en la fabricación de compósitos de matriz metálica, pero para lograr tal propósito, primeramente, deben someterse a un adecuado procedimiento de limpieza que permita eliminar toda la suciedad superficial, resultado del proceso de manufactura del cual parten.

Adicionalmente, el estudio del efecto del tiempo de mezclado, la temperatura y el tiempo de sinterizado sobre la microestructura y la dureza de compósitos de matriz metálica base aluminio reciclado, es esencial para general un compósito óptimo. Al evaluar los parámetros mencionados, es crucial para el procesamiento de piezas en estado sólido además de precisar la interacción de residuos metálicos (virutas) y refuerzos cerámicos particulados a fin de proporcionar una alternativa simple y económica para la fabricación y el desarrollo de materiales compuestos de matriz metálica (MMC) vía estado sólido [1, 10].

En este proyecto se utilizaron residuos de máquinas utilizadas en talleres mecánicos, específicamente cortadoras de sierra de cinta, de donde se obtuvo la rebaba; y de torno, del cual se produjo la viruta. Una vez teniendo el material limpio, se procedió a mezclar con partículas de SiC para después, mediante procesos de compactación y sinterización, obtener probetas de material compuesto de matriz metálica [5].

1.2 Los residuos

De acuerdo con la RAE, un residuo se define como un “material que queda inservible después de haber realizado un trabajo u operación”, otra fuente define los residuos como “aquellos materiales o productos cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentran en estado sólido o semisólido, líquido o gaseoso y que se contienen en recipientes o depósitos; pueden ser susceptibles de ser valorizados o requieren sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en la misma Ley”. En ambos casos se da a entender que los residuos son partes sobrantes de algún material después de haber realizado algún proceso y que en la mayoría del tiempo son inservibles para quienes los producen [10-16]

Otro aspecto importante de los residuos y como se indica en “*Waste A Handbook for Management*” [16], es que estos presentan uno de los mayores retos

ambientales y de salud pública, esto debido al incremento exponencial de los residuos relacionado a las revoluciones industriales que se han suscitado, ya que conforme se va introduciendo y presentando nueva tecnología, también se van originando nuevos residuos, proveniente de la manufactura o el final de la vida útil de algún artefacto o material. Es debido a estos factores que el reciclaje se ha convertido en una de las principales formas de manejar los residuos, práctica que incluso en algunos casos puede dejar una remuneración monetaria, como lo podemos ver en centros de reciclaje, los cuales normalmente son de PET o metales (como cobre y aluminio).

1.2.1 Clasificación de residuos

En el presente proyecto se trabajó con residuos metálicos, los cuales, en términos generales son clasificados como ferrosos o no ferrosos, se sabe que los residuos desde hace muchos años (aproximadamente 5000 años antes [16]) han sido reciclados, sobre todo por el gran costo energético que conlleva el extraer metales de minerales en comparación a sólo utilizar los residuos que ya se tienen. Aunque no todo es tan fácil, muchas veces es necesario cumplir con ciertos estándares en los residuos metálicos, es decir, que no contengan algún tipo de impureza intrínseca como puede observarse en la figura 1 (pintura, óxido, revestimientos o suciedad superficial) o no intrínseca como se observa en la figura 2 (madera, aceites, concreto, lodo, goma, lubricantes, lana de vidrio, escoria proveniente de fundición).



Figura 1. Tipos de impurezas intrínsecas; a) pintura, b) óxido, c) revestimientos y d) suciedad superficial [9].

Una vez que se ha corroborado la ausencia de dichas impurezas, se procede al procesamiento de estos residuos metálicos (más específicamente conocidos como

chatarras ferrosas y no ferrosas). En la tabla 1 se describe a detalle algunos tipos de chatarra comunes, así como los métodos empleados en su procesamiento [16, 17].

Actualmente, una de las aleaciones base aluminio más comunes y empleadas en todo el mundo y con presencia en sectores industriales que van desde la aeronáutica hasta la industria de alimentos, es la aleación 6061. Se emplea tanto para moldes de inyección y de soplado; en la construcción de diversas estructuras de aeronaves de uso comercial y militar (fuselaje y alas); en la construcción de barcos (desde yates hasta embarcaciones de menor tamaño) y finalmente, en latas para el empaquetado tanto de comidas como de bebidas.



Figura 2. Tipos de impurezas no intrínsecas; a) madera, b) aceites, c) concreto, d) lodo, e) goma, f) lubricantes, g) lana de vidrio y h) escoria proveniente de fundición [17].

Tabla 1. Diferentes tipos de chatarras (residuos) y métodos de procesamiento [15].

Tipo de chatarra	Métodos de procesamiento
Chatarra mixta ligera de consumo, vehículos al final de su vida útil	Trituración con trituradora, posterior separación con clasificador de aire, separador magnético y selección manual
Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos	Trituración con molino de martillos, separación posterior con clasificador de aire, separador magnético y otros equipos
Chatarra de cables	Conminución con cizallas de rotor y granuladores, posterior separación con mesas de aire, y otros equipos
Cenizas de la incineración de desechos, ferrosos y no ferrosos	Clasificación con cribas, conminución con trituradora, posterior separación de metales
Chatarra mixta de acero inoxidable	Trituración con cizalla hidráulica o trituradora, posterior separación de metales
Productos metálicos intermedios de plantas de clasificación de residuos (virutas, polvos, rebabas)	Conminución con molino de martillos, separación posterior con separadores magnéticos y corrientes de Foucault, además de otros equipos
Chapas y residuos de estampación (laminas)	Compactación con prensa de chatarra
Torneados de metales ferrosos y no ferrosos (virutas)	Trituración con trituradora de virutas, posterior separación de fluidos de corte con centrífuga, separador magnético
Chatarra pesada con espesores de pared superiores a 150 mm	Trituración con cizalla hidráulica para chatarra, en caso necesario con cribado posterior de finos
Chatarra de hierro fundido	Conminución con trabajo de caída vertical

1.3 Usos de los residuos en la fabricación de piezas metálicas

Dentro de los residuos metálicos que más interés consiguen son aquellos en forma de polvos. Su atractivo se debe a que es posible mediante metalurgia de polvos, obtener piezas metálicas complejas que poseen propiedades mecánicas, físicas o químicas elevadas e incluso con diseños difíciles de lograr. Algunos de los polvos metálicos más utilizados en procesos pulvimetalúrgicos son: hierro, cobre, aluminio, estaño, níquel, titanio, metales refractarios e incluso polvos cerámicos [18, 19]. La figura 3 muestra algunos componentes fabricados mediante pulvimetalurgia.



Figura 3. (a) Ejemplos de partes comunes fabricadas por medio de procesos de metalurgia de polvos. (b) Palanca superior de disparo para un rociador comercial de riego elaborada mediante M/P. Esta parte se produce con una aleación de latón sin plomo; reemplaza a una parte fundida a presión en matriz con un ahorro de 60% del costo. (c) Tapas fabricadas por metalurgia de polvos para soportes principales para motores automovilísticos (cojinetes) de 3.8 y 3.1 litros de General Motors [19].

1.4 Materiales compuestos

Gran cantidad de los productos fabricados vía pulvimetalúrgica, son materiales compuestos de matriz metálica (MCMM). De acuerdo con el libro “*ASM Handbook Volume 21*” [15] se consideran materiales compuestos a una combinación macroscópica de dos o más materiales distintos, los cuales, además tienen una interfaz reconocible entre ellos, de igual forma, se define como materiales que contienen un constituyente de matriz continua, el cual se adiciona y une para implementar una serie de refuerzos a las propiedades del metal base, esto provoca que el material compuesto tenga propiedades mayores a las que tendría cualquiera de sus materiales constituyentes por separado.

Un incremento en el módulo elástico, mayor tenacidad, ductilidad y mayor resistencia térmica, son parte de los beneficios alcanzados en piezas de MCMM empleando metalurgia de polvos, en su manufactura. Dichos materiales por lo general tienen matrices de aluminio, magnesio, cobre, titanio y superaleaciones. Por otra parte, los materiales de refuerzo por lo general llegan a ser carburos, óxidos, nitruros, boruros, etc. [19].

Respecto a los carburos, existe una gran variedad de estos, aunque los más empleados son SiC, WC, TiC, entre otros. Tanto el carburo de silicio como el carburo de tungsteno son carburos que otorgan un incremento en las propiedades mecánicas del compuesto en el que se empleen; también confieren una buena

resistencia al impacto térmico, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y un bajo coeficiente de fricción. Todas estas propiedades hacen que los composites reforzados con estos carburos sea buenos candidatos para emplearse en piezas o componentes que serán sometidos a altas temperaturas y/o al desgaste [19-21].

1.4.1 Fabricación de materiales compuestos mediante pulvimetalurgia

Para llevar a cabo la fabricación de un componente vía pulvimetalúrgica, es preciso contar con los polvos de los materiales a emplear. Existen diversos métodos para la fabricación de polvos metálicos y dependiendo del método de producción utilizado, se pueden obtener diferentes geometrías y características que tendrán una influencia directa en las propiedades finales de los productos (véase en la figura 4). Los principales métodos de producción de polvos son: atomización, deposición electrolítica, reducción, carbonilos, trituración o pulverización, aleación mecánica, precipitación y condensación de vapor. [19]

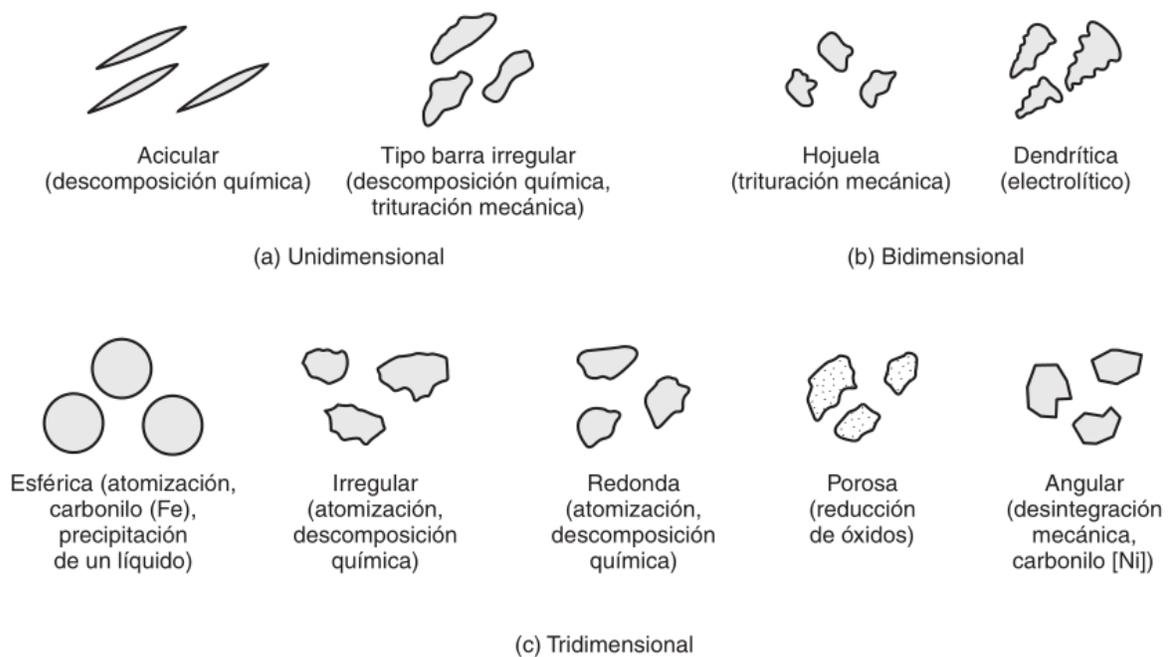


Figura 4. Forma de las partículas en la metalurgia de polvos y procesos por los cuales se producen [19].

1.4.1.1 Mezclado de polvos

Una vez obtenidos los polvos metálicos, se procede a hacer un análisis de estos, se determina tanto el tamaño como la forma, con el fin de emplear aquellos polvos que proporcionen las características requeridas. Posteriormente, se realiza el mezclado de estos a fin de generar una mezcla homogénea y alcanzar una distribución uniforme del refuerzo; todo lo anterior para garantizar la uniformidad de las propiedades físicas, químicas o mecánicas, en toda la pieza. Cuestiones esenciales para lograr una buena dispersión y distribución del refuerzo es la regulación de la velocidad de mezclado, así como la correcta selección del medio o recipiente de mezclado (como se observa en la figura 5). Adicional a los puntos anteriores, es posible uso de agentes lubricantes y aglutinantes; los primeros pueden mejorar las características de flujo, reducir la fricción entre las partículas y mejoran la vida de la matriz, mientras que los segundos, se utilizan para desarrollar suficiente resistencia en verde [19].

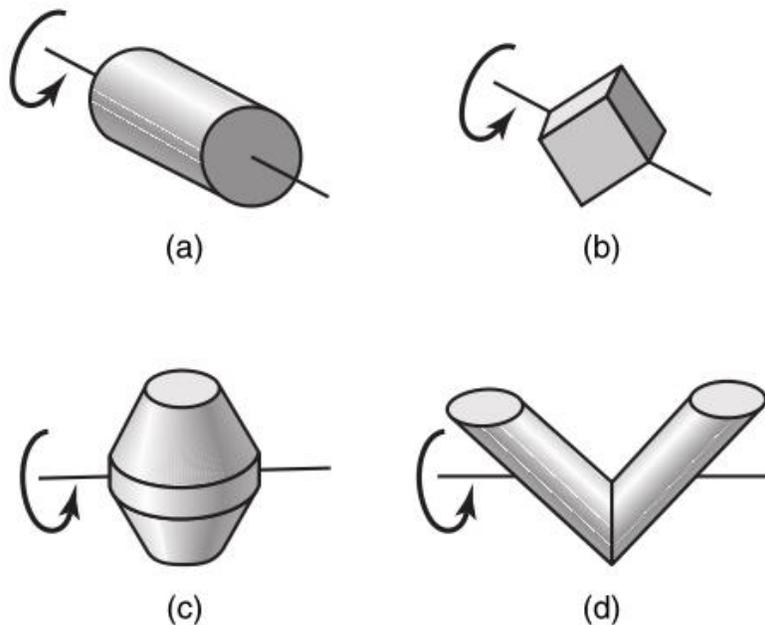


Figura 5. Recipientes comunes utilizados en la industria para la mezcla de polvos [18].

1.4.1.2 Compactación de polvos

Una vez alcanzada una mezcla homogénea, el siguiente paso es generar la pieza en verde por medio de la aplicación de una carga (proceso de compactación); en esta parte del proceso se les da una forma final a los polvos utilizados (véase ejemplo en la Figura 6). En términos generales, este paso consiste en introducir la mezcla de polvos en una matriz mediante cierto alimentador y se utilizan prensas hidráulicas o mecánicas para comprimir o compactar la mezcla de polvos (compactado en verde). Este parte del proceso se realiza generalmente a temperatura ambiente y se obtiene un compactado con una baja resistencia mecánica. Debido a lo anterior, el compactado en verde debe manejarse con precaución para evitar que pueda desmoronarse [19].

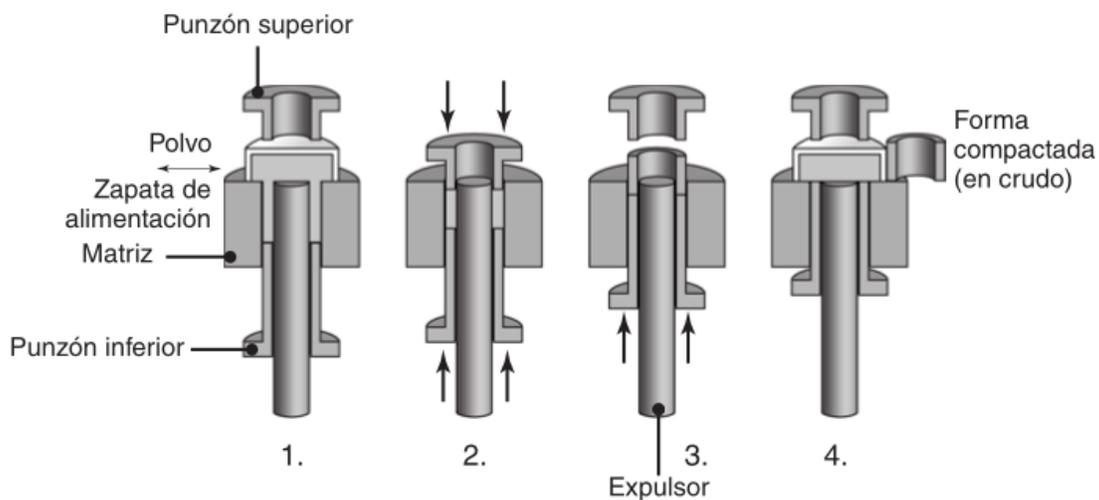


Figura 6. Ejemplo de compactación de polvos para realizar un buje [19].

A medida que se incrementa la carga aplicada en el compactado en verde, la densidad de la mezcla de polvos se aproxima a la del metal base en su forma sólida. La cuestión anterior se ve afectada por el tamaño de las partículas con las que se trabaja; una mezcla de partículas pequeñas y grandes arrojará una densidad mayor que al trabajar con una mezcla con partículas de un solo tamaño. Esta variación en cuanto al tamaño de partículas afecta al compactado en la medida que cuanto más se aproxime la densidad de este a la del metal base, más elevada será su resistencia y módulo elástico, como se puede apreciar en la figura 7 [18, 19].

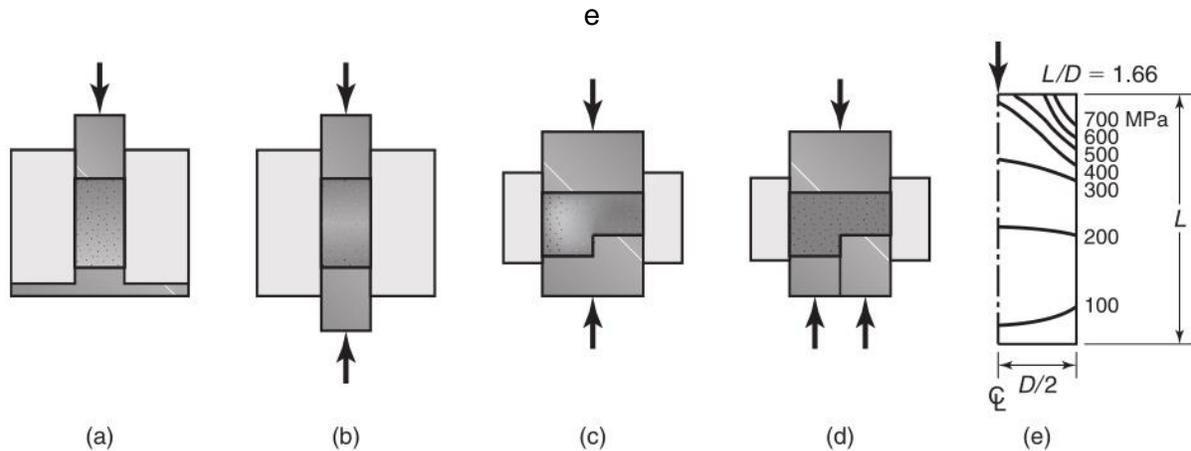


Figura 7. Variación de la densidad al compactar polvos metálicos en diversas matrices: (a) y (c) prensa de acción simple; (b) y (d) prensa de doble acción. Obsérvese en (d) la mayor uniformidad de la densidad al prensar con dos punzones con movimiento independiente, en comparación con (c). (e) Ejemplo de perfiles de presión en polvo de cobre compactado en una prensa de acción simple. [19].

1.4.1.3 Sinterizado de polvos

El último paso del proceso es el sinterizado, mismo que consiste en calentar los compactados crudos en hornos empleando de preferencia, una atmósfera controlada. Un aspecto a considerar es la temperatura de sinterización, la cual está en función de la temperatura de fusión de los polvos compactados y de las características a conseguir. Si esta es lo suficientemente alta, se favorece la unión de las partículas individuales mediante difusión dando como resultado el incremento de la ductilidad, densidad, resistencia y conductividades térmicas y eléctricas del material compactado.

Otro mecanismo que influye notablemente al momento de sinterizar un compactado en verde es el transporte de la fase vapor. Este mecanismo se presenta cuando se trabaja con temperaturas cercanas a la temperatura de fusión del material, cuando esto acontece, algunos átomos del metal se liberan como fase vapor y solidifican al poco tiempo, provocando una unión y refuerzo en el compactado como se observa en la figura 8 [17, 22].

Normalmente, las variables que afectan de manera directa el sinterizado son:

- Temperatura. Se encuentra entre un 70% y un 90% del punto de fusión o aleación a sinterizar.
- Tiempo. Este varía de 10 minutos a incluso 8 horas, dependiendo del material.
- Atmósfera del horno. Atmósferas con ciertos niveles de oxígeno o sin él, son importantes para evitar la oxidación de los polvos y en el caso de los metales base hierro, controlar la carburación o descarburación de estos.

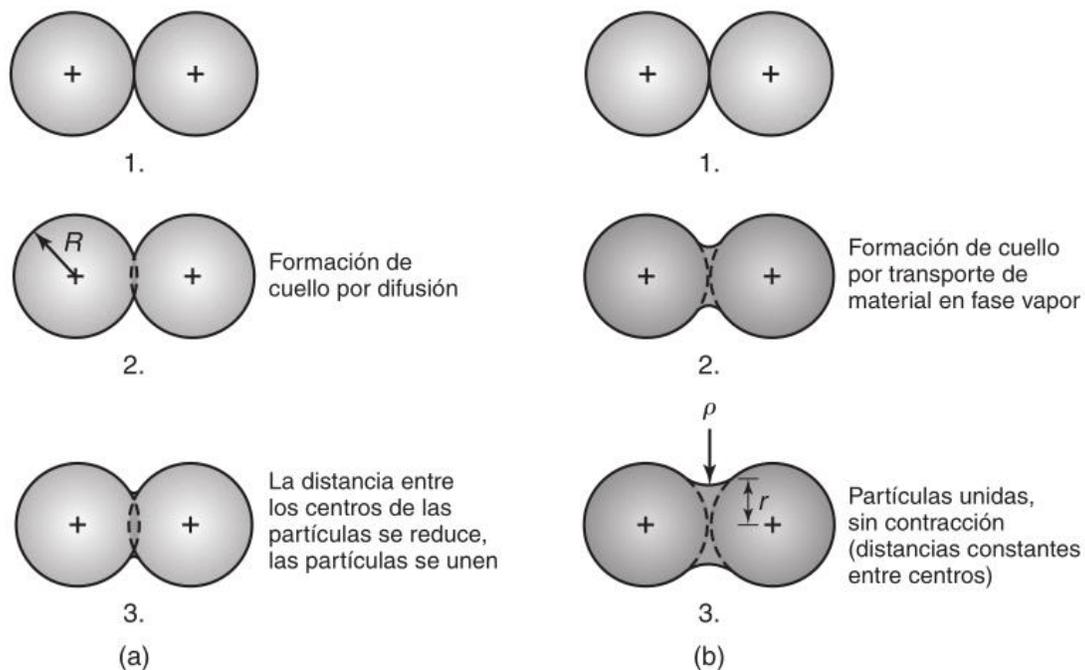


Figura 8. Esquema de dos mecanismos para sinterización de polvos metálicos: (a) transporte de material de estado sólido, y (b) transporte de material de fase vapor. R =radio de la partícula, r =radio del cuello y ρ =radio del perfil del cuello [19].

En la Tabla 2, se muestran las temperaturas de sinterización recomendadas de acuerdo con el sistema que se esté trabajando [11].

Tabla 2. Temperaturas de sinterización para polvos metálicos y cerámicos especiales [19].

Material para sinterizar	Temperatura de sinterizado (°C)
Aleaciones de aluminio	590-620
Bronce	740-780
Hierro, aceros al carbono, aceros de baja aleación (Cu, Ni)	1120-1150
Aceros de baja aleación (Cu, Ni, Mo)	1120-1200
Aceros ferríticos y austeníticos de alta aleación (Cr, Cr-Ni)	1200-1280
Imanes duros (Alnico)	1200-1350
Metales duros base TiC (cementados)	1350-1450
Molibdeno y aleaciones de molibdeno	1600-1700
Tungsteno	200-2300
Metales pesados (W)	~1400
Aceros ferríticos	1100-1300
Nitrato de silicio (con diferentes aditivos)	1750-2000
Carburo de silicio (con diferentes aditivos)	1750-2100
Alúmina	1400-1800
Zirconia (con diferentes aditivos)	1400-1750

Hay que recalcar que la metalurgia de polvos no sólo se emplea en la producción de componentes de un solo material, es decir, materiales monolíticos, sino que, en la actualidad, es una de las principales rutas de síntesis vía sólida de materiales compuestos de matriz metálica. La figura 9 muestra formas de clasificación habituales empleadas en los materiales compuestos de matriz metálica.

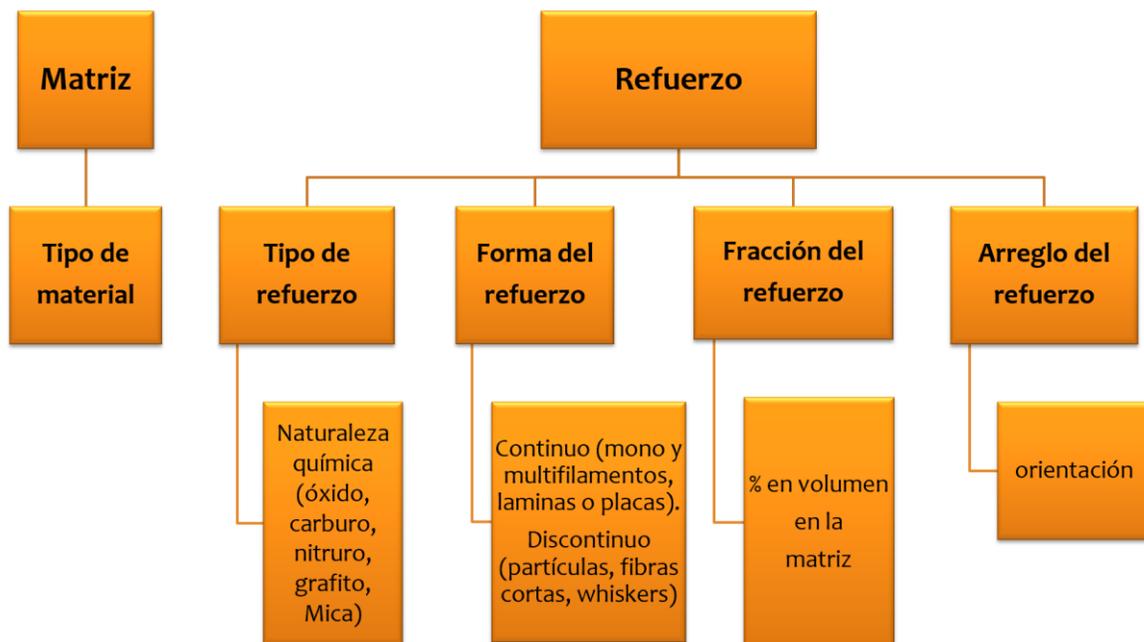


Figura 9. Formas habituales de clasificación de los materiales compuestos [15].

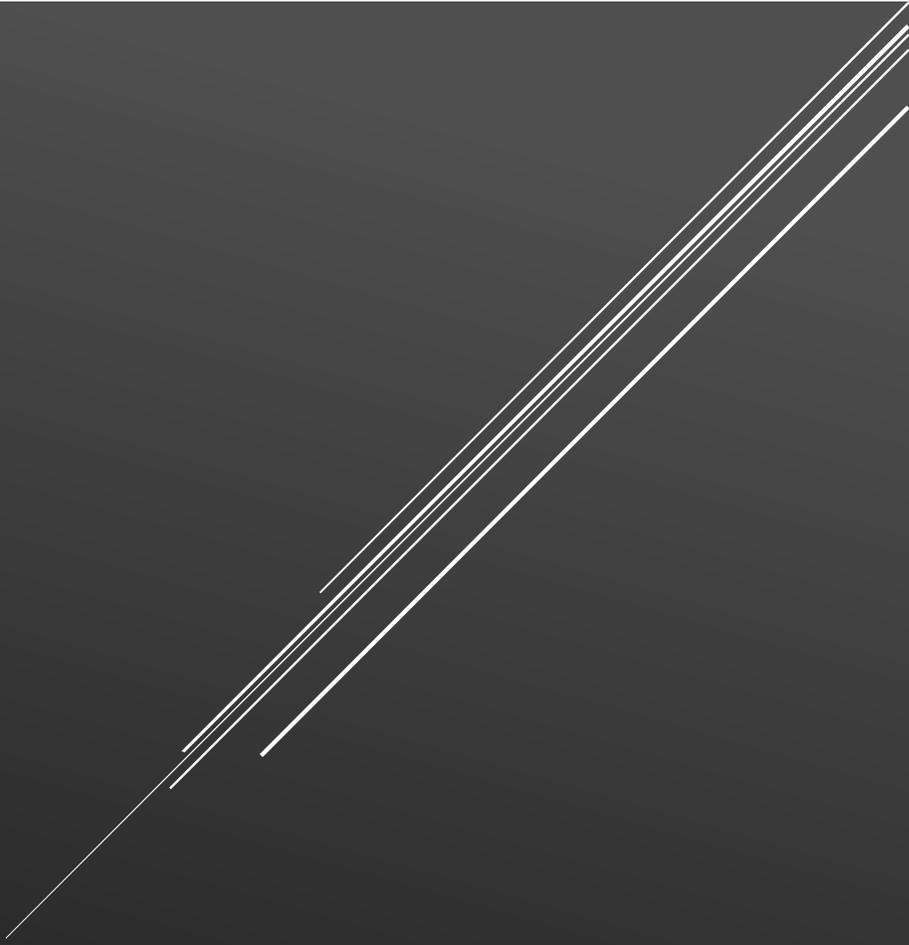
Hipótesis

La continuidad de la matriz y una interfase óptima entre la matriz y el refuerzo en los compósitos reforzados con 5% en volumen de partículas de carburo de silicio y carburo de tungsteno aumentarán a medida que se incremente el valor de los parámetros bajo estudio (tiempo de mezclado, temperatura y tiempo de sinterizado). Se contempla a la temperatura como variable significativa, es decir, que su impacto sobre la dureza y la densidad de los compósitos será mayor en comparación con el tiempo de sinterizado y de mezclado.

Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivos:

- a) Precisar la ruta de tratamiento (clasificación, eliminación de impurezas, fragmentación y reintroducción) de los residuos de aluminio 6061.
- b) Caracterizar morfológica y químicamente, polvos de carburo de silicio, carburo de tungsteno y residuos de aluminio 6061 empleando las técnicas de Microscopía Óptica, Microscopía Electrónica de Barrido-EDS y fluorescencia de rayos X (XRF).
- c) Evaluar el efecto del tiempo de mezclado, la temperatura y el tiempo de sinterizado sobre la microestructura, la densidad y la dureza de materiales compuestos reforzados con 5% vol. de partículas de SiC y WC producidos por ruta sólida.



METODOLOGÍA DE TRABAJO

Metodología de trabajo

En este capítulo se detalla la metodología experimental seguida en el presente trabajo.

Las actividades comprendidas en este estudio comenzaron con la recolección de los residuos metálicos de aluminio. Se obtuvo un kilogramo de residuos provenientes de cortadora de sierra de cinta en forma de rebaba y un kilogramo de residuos de torno en forma de viruta del tipo tubular enredada, helicoidal plana enredada y arqueadas conexas de acuerdo a la clasificación de la norma ISO 3685. Estos residuos fueron primeramente sometidos a una inspección visual donde a partir de esta, se percibieron restos de madera y así como de lubricantes de la máquina de corte. Por su parte, el segundo tipo de muestra (virutas) se encontraba cubierta de suciedad debido a que esta se obtuvo mediante torno, siendo residuos del metal perforado.

El trabajo experimental comprendido en este estudio es mostrado en la figura 10:

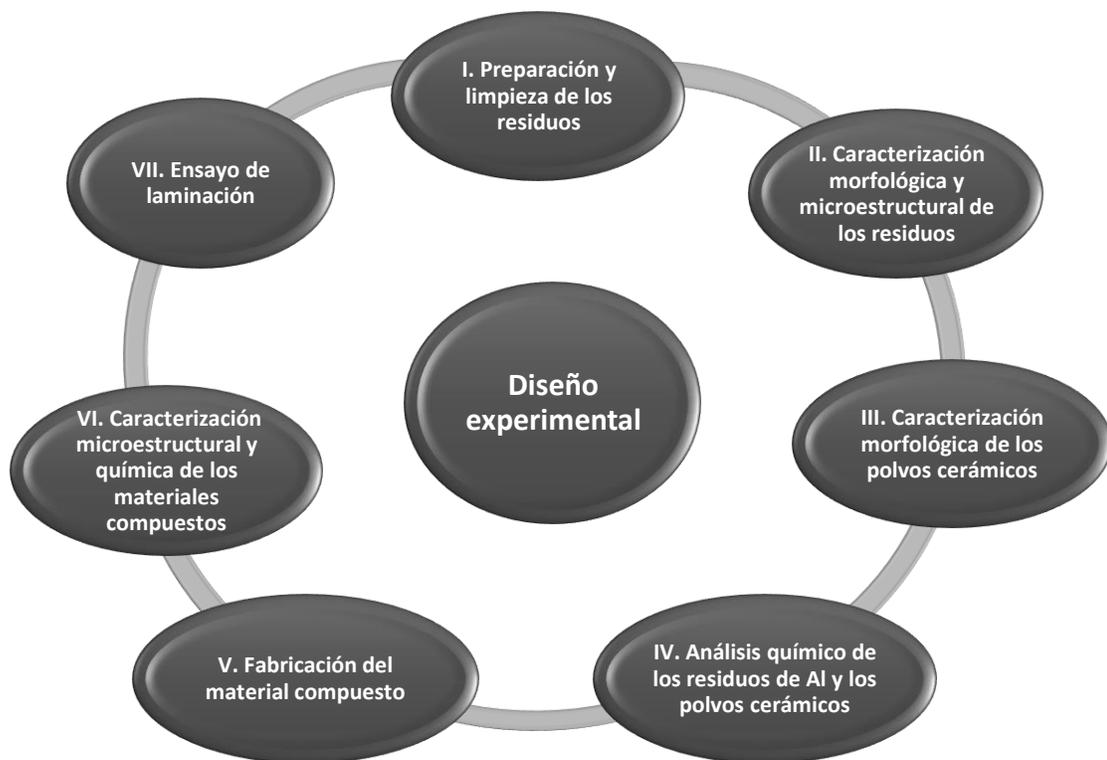


Figura 10. Procesos llevados a cabo en el desarrollo experimental.

1. Preparación y limpieza de los residuos.

Para la limpieza de dichos residuos se realizaron baños ultrasónicos con acetona, alcohol isopropílico, bencina y una mezcla de sales de potasio de ácidos grasos, donde se probaron diferentes combinaciones para obtener los mejores resultados de limpieza. El procedimiento se describe a continuación:

1.1 Se pesaron aproximadamente 5 g tanto de rebaba como de viruta (véase en la figura 11).

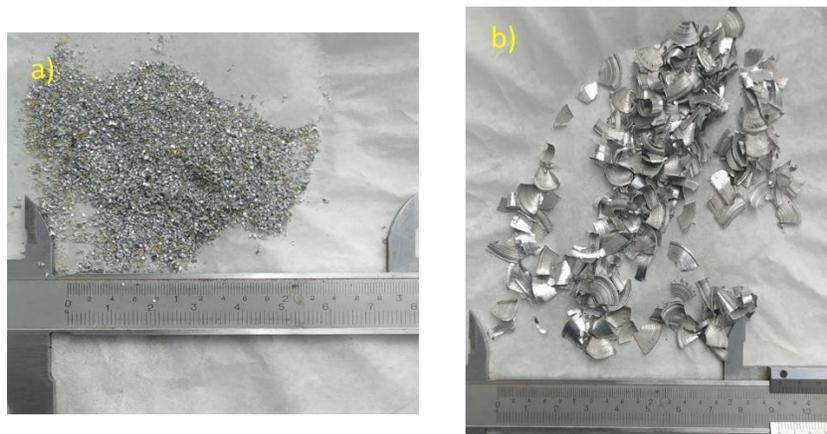


Figura 11. Ejemplo de los residuos pesados, a) rebaba y b) viruta.

1.2 Las muestras de rebaba se sometieron a una limpieza inicial con lauril sulfato de sodio líquido por medio de un baño ultrasónico para mejorar los resultados (véase en la figura 12).



Figura 12. Limpieza de muestras de rebaba con una mezcla de sales de potasio de ácidos grasos.

1.3 Después de dichos baños, se depositaron las muestras de residuos en un vaso de precipitados (rebabas o virutas) y fueron cubiertas con bencina o acetona. Después, dicho vaso se colocó en un baño ultrasónico por 9 minutos, como se aprecia en la figura 13.

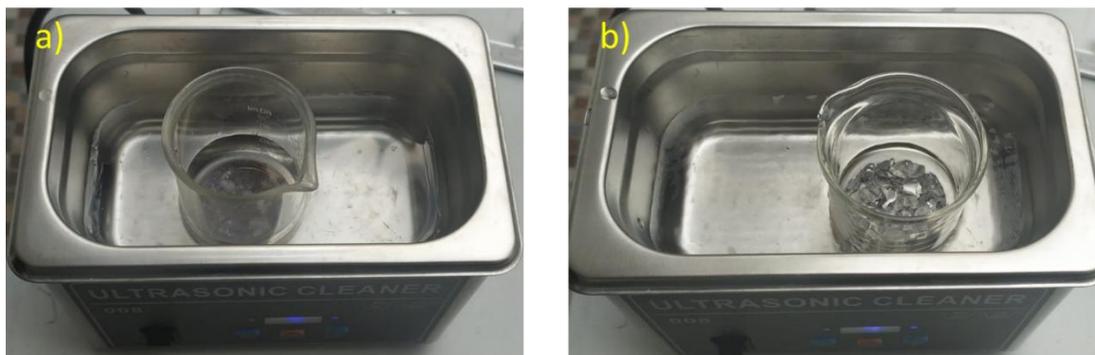


Figura 13. Residuos siendo limpiados con ayuda de un baño ultrasónico: a) rebaba y b) viruta.

1.4 Si después del baño ultrasónico la solución agregada es incolora y no presenta precipitados, se filtraba, de lo contrario, se repetía la limpieza con la misma solución (bencina o acetona).

1.5 Una vez concluida la limpieza con la primera solución, se repitió el procedimiento empleando alcohol isopropílico. Posteriormente, se realizó otra inspección visual; si se observan precipitados o turbidez, se reproduce el procedimiento descrito previamente, de lo contrario, se procedía a filtrar (figura 14).

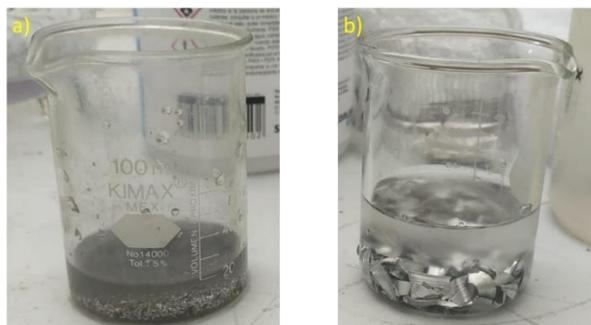


Figura 14. Muestras después de haber sido limpiadas con bencina, denotando la suciedad en cada una de estas, siendo a) rebaba y b) viruta.

1.6 Una vez limpias las muestras estas se dejaban dentro de un horno estufa por 20 minutos a 280°C para eliminar cualquier humedad restante (véase en la Figura 15).

1.7 Finalmente, se tomaron muestras y se montaron en frío empleando resina epóxica a fin de llevar a cabo una preparación metalográfica de las mismas.



Figura 15. Muestras después de haber sido limpiadas con las diferentes combinaciones mostradas, puestas a secar.

En el caso de la rebaba de aluminio con restos de madera, se realizaron pasos adicionales para su separación mediante métodos gravimétricos y calcinación.

1.8 Métodos gravimétricos.

1.8.1 Se vertió rebaba de aluminio dentro de un recipiente transparente.

1.8.2 Se agregó agua hasta cubrir la muestra y después, se agitó vigorosamente.

1.8.3 Por último, se dejó reposar la muestra para obtener la separación de ambos materiales. El procedimiento fue repetido empleando acetona (para mejores resultados de limpieza).

1.9 Calcinación

- 1.9.1 Se extendió el polvo de aluminio en un recipiente metálico y se introdujo en un horno estufa a una temperatura de 280°C por 15 minutos.
- 1.9.2 Transcurrido el tiempo, el material fue sacado y mezclado; posteriormente, fue devuelto a la estufa. Las muestras se mantuvieron a la misma temperatura por otros 15 minutos.
- 1.9.3 A continuación, se dejaron enfriar y se procedió a inspeccionar las muestras y a almacenarlas.

2. Caracterización morfológica y/o microestructural de los residuos.
Se realizó un montaje en frío de los residuos previamente limpiados (como se muestra en la figura 16) por las distintas rutas planteadas, a fin de llevar a cabo su preparación metalográfica y posteriormente, su caracterización microestructural.



Figura 16. Ejemplo de muestras de residuos limpios montadas en frío.

2.1 Diversas muestras se sometieron a preparación metalográfica convencional. Se procedió a un desbaste grueso y fino pasando por lijas de SiC del número 80, 120, 240, 320, 600 y 1000. Después, las muestras fueron pulidas con paño grueso y fino empleando alúmina de 3 mm como abrasivo. Finalmente, se obtuvieron micrografías con y sin revelado químico; ejemplo de estos materiales en la figura 17.

2.2 Por último, se analizó la microestructura de los residuos y se corroboró la limpieza de las muestras.



Figura 17. Material utilizado para la preparación metalográfica de las muestras previamente montadas en frío.

3. Caracterización morfológica de los polvos cerámicos.

Muestras de partículas de carburo de silicio y carburo de tungsteno fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) con la finalidad de obtener imágenes y análisis químicos puntuales de estas partículas.

3.1 Para determinar el diámetro promedio de las partículas, así como la relación de aspecto y el nivel de redondez de los refuerzos, se realizó un análisis complementario de las micrografías obtenidas por MEB y el programa de análisis Image-Pro. Los parámetros determinados fueron:

3.1.1 Aspecto: indica la relación entre el eje mayor y el eje menor de un cuerpo con forma elíptica equivalente al objeto (es decir, una elipse con la misma área). El aspecto siempre es mayor que 1.

- 3.1.2 Diámetro medio: indica la longitud promedio de los diámetros medidos a intervalos de dos grados que unen dos puntos de contorno y pasan por el centroide.
- 3.1.3 Redondez: indica la redondez de cada objeto, según lo determinado por la siguiente fórmula: $\text{perímetro}^2 / (4\pi \cdot \text{área})$. Los objetos circulares tendrán una redondez =1; otras formas tendrán una redondez >1.

4. Análisis químico de los residuos de aluminio y los polvos cerámicos. Muestras de rebaba y viruta de aluminio, así como de los polvos cerámicos (SiC y WC) se sometieron a análisis químico elemental por fluorescencia de rayos X.

- 4.1 Los análisis obtenidos fueron comparados con los análisis puntuales (en el caso de los polvos cerámicos) y los aluminios con las composiciones encontradas en la literatura.
- 4.2 Aunado a fluorescencia, se realizó un microanálisis por dispersión de energías de rayos X (MEB-DRX) de los refuerzos cerámicos SiC y WC, así como de la matriz metálica 6061 a fin de determinar su composición química.

5. Fabricación del material compuesto.

5.1 Pruebas preliminares

- 5.1.1 Para la fabricación de probetas de material compuesto se consideró un porcentaje de refuerzo del 5% en volumen de SiC o WC; las dimensiones de la probeta a obtener fueron 2x0.5x0.25 [in]. Con base en esto, se realizaron los cálculos pertinentes para determinar la cantidad de material a mezclar tanto de residuos de aluminio como de los polvos cerámicos, dichos cálculos los podemos observar en el Anexo A.
- 5.1.2 Una vez pesados los polvos de material cerámico y los residuos de aluminio requeridos, el procedimiento a seguir

para generar el compósito dependió del residuo empleado. Para el caso de la rebaba, este material se mezcló con las partículas de carburo de silicio o de tungsteno con ayuda de un mezclador de velocidad controlada fijada en 900 rpm (figura 18a); la velocidad se corroboró con un tacómetro.

5.1.3 En el caso de la viruta el mezclado se realizó con ayuda de un molino de bolas (mostrado en la figura 18b), provocando así un aleado mecánico entre las partículas cerámicas (SiC y WC) con la viruta de aluminio.

5.1.4 La compactación de las mezclas para la obtención de los compósitos en verde se llevó a cabo con una máquina universal de ensayos mecánicos marca “*Mohr & Federhaff Losenhausen*” (mostrada en la figura 19); la carga aplicada fue de 150 kN. Y, se utilizó aceite orgánico como lubricante para evitar el desprendimiento de masa y defectos superficiales en el proceso, este fue aplicado en las matrices utilizadas para la compactación de los materiales metálicos y los polvos cerámicos

5.1.5 Finalmente, las muestras fueron sinterizadas para consolidar la unión de los polvos mediante enlaces atómicos entre las partículas y así proporcionar resistencia. Se empleó una temperatura de 540° C por un tiempo de sinterizado de 1.5 horas tomando como base lo reportado en la literatura [2, 21-22].

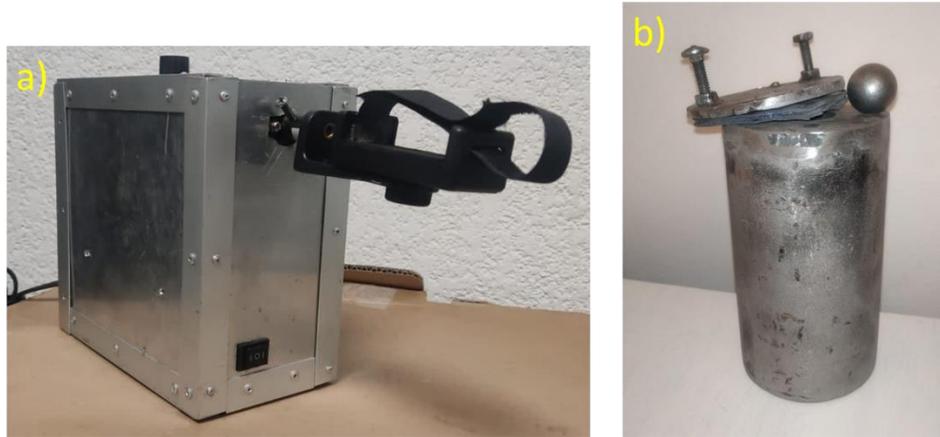


Figura 18. a) Mezcladora y b) molino de bolas.



Figura 19. Máquina de ensayos universal, marca "Mohr & Federhaff Losenhausen".

5.2 Diseño factorial.

Con base en las pruebas preliminares, se procedió a implementar ciertas condiciones para la fabricación de los compósitos siguiendo ambas rutas de síntesis (mezclado y aleado); también se consideró lo reportado en estudios previos [23- 28]. Con el fin de evaluar su efecto sobre los compósitos fabricados, estas condiciones se replicaron; detalle de estas se reporta en la tabla 3.

Tabla 3. Condiciones de fabricación para compósitos 6061/SiC_P o 6061/WC_P.		
Variable	Sistema Al-SiC	Sistema Al-WC
Tiempo de mezclado (min)	t ₁ , t ₂ , t ₃	t ₁ , t ₂ , t ₃
Tiempo de aleado (min)	t ₂ , t ₃ , t ₄	t ₂ , t ₃ , t ₄
Carga de compresión (kN)	W	W
Temperatura de sinterización (°C)	T ₁ , T ₂ , T ₃	T ₁ , T ₂ , T ₃
Tiempo de sinterización (h)	t ₅ , t ₆	t ₅ , t ₆

donde:

$$\begin{aligned}
 t_1 &= 15 \text{ min} & t_5 &= 60 \text{ min} & T_1 &= 530^\circ\text{C} \\
 t_2 &= 30 \text{ min} & t_6 &= 120 \text{ min} & T_2 &= 550^\circ\text{C} \\
 t_3 &= 45 \text{ min} & t_7 &= 90 \text{ min} & T_3 &= 580^\circ\text{C} \\
 t_4 &= 60 \text{ min} & W &= 220 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Una vez definidas las variables a estudiar, se procedió a realizar un diseño factorial (Anexo B), el cual constó de 8 corridas experimentales con tres réplicas y un punto central con sus respectivas replicas.

$$2^k = 2^3 = 8$$

Tabla 4. Diseño factorial del experimento para compósitos 6061/SiC_P o 6061/WC_P.						
No. de muestra	X₁		X₂		X₃	
1	t ₁	(-)	T ₁	(-)	t ₅	(-)
2	t ₁	(-)	T ₁	(-)	t ₆	(+)
3	t ₁	(-)	T ₃	(+)	t ₅	(-)
4	t ₁	(-)	T ₃	(+)	t ₆	(+)
5	t ₂	P.C.	T ₂	P.C.	t ₇	P.C.
6	t ₃	(+)	T ₁	(-)	t ₅	(-)
7	t ₃	(+)	T ₁	(-)	t ₆	(+)
8	t ₃	(+)	T ₃	(+)	t ₅	(-)
9	t ₃	(+)	T ₃	(+)	t ₆	(+)

donde:

X₁ = tiempo de mezclado (-, p.c. y +)

X₂ = temperatura de sinterizado (-, p.c. y +)

X₃ = tiempo de sinterizado (-, p.c. y +)

5.3 Fabricación de los materiales compósitos.

- 5.3.1 Para la fabricación de probetas de material compuesto se consideró el mismo porcentaje de refuerzo (5% en volumen de SiC o WC) y una probeta a obtener de dimensiones 2x0.5x0.25 [in], al igual que las probetas realizadas en las pruebas preliminares.
- 5.3.2 De igual forma, en el caso de la rebaba, este material se mezcló con las partículas de carburo de silicio o de tungsteno usando los tiempos mostrados en la tabla 1, esto con ayuda de un mezclador de velocidad controlada fijada en 900 rpm (figura 18a); la velocidad se corroboró con un tacómetro.
- 5.3.3 En el caso de la viruta el mezclado se realizó con ayuda de un molino de bolas (mostrado en la figura 18b), provocando así un aleado mecánico entre las partículas cerámicas (SiC y WC) con la viruta de aluminio.
- 5.3.4 La compactación de las mezclas para la obtención de los compósitos en verde se llevó a cabo con una máquina universal de ensayos mecánicos “MTS modelo 810” (mostrada en la figura 20); la carga aplicada fue de 220 kN. Y, se utilizó aceite orgánico como lubricante para evitar el desprendimiento de masa y defectos superficiales en el proceso, este fue aplicado en las matrices utilizadas para la compactación de los materiales metálicos y los polvos cerámicos
- 5.3.5 Finalmente, las muestras fueron sinterizadas con el objeto de generar unión mediante enlaces atómicos entre las partículas y proporcionar resistencia empleando para ello una mufla a las temperaturas y tiempos de sinterización mostrados en la tabla 1.



Figura 20. Máquina de ensayos universal, marca “MTS”.

6 Caracterización microestructural y química de los materiales compuestos.

Una vez fabricados los materiales compuestos, se procedió someterlos a una preparación metalográfica. El procedimiento llevado a cabo fue similar al empleado en la caracterización microestructural de cada muestra.

6.1 Preparación microestructural. Las muestras fueron sometidas a desbaste grueso y fino empleando lijas al agua de SiC con grano 80, 120, 240, 320 y 600. El pulido se realizó empleando paños grueso y fino, y alúmina de 3 mm como abrasivo. Las muestras se sometieron a una limpieza con acetona en un baño ultrasónico a fin de eliminar partículas de alúmina o alguna otra incrustación. Por último, se les aplicó calor con ayuda de una estufa para eliminar cualquier resto de humedad en los materiales.

6.2 Caracterización microestructural. Se tomaron micrografías a 100x y 500x sin revelado químico de las muestras en un microscopio óptico “*OLYMPUS PMG 3*” y se analizaron las partículas de refuerzo presentes en dichos materiales.

6.3 Caracterización química. Los materiales compuestos se analizaron en un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca JEOL JCM-6000 NeoScope

(mostrado en la figura 21), operando a bajo vacío, con electrones retrodispersados y empleando un potencial de aceleración de 15 kV, en el cual se realizaron mapeos elementales, análisis puntuales y análisis lineales, buscando Zn, Cu, Mg, Mn, Si, C, Ti y W.



Figura 21. Microscopio electrónico de barrido, marca “JEOL JCM-6000 NeoScope”.

7 Ensayo de laminación.

7.1 Una vez que se caracterizaron los materiales se realizaron pruebas de laminación en una máquina “OAM CAVALLIN M120” (mostrada en la figura 22), misma en la cual se procedía a deformar los materiales compuestos de 0.1 mm en 0.1 mm, tomando como referencia la medida presentada en la figura 23.

7.2 Esta deformación se llevó a cabo hasta que las piezas ensayadas denotaban una falla, deteniendo en ese momento la laminación.

7.3 Una vez laminadas las piezas, se observaron en un microscopio óptico con el fin de determinar el tipo de falla presentada en estas.



Figura 22. Máquina laminadora, marca "OAM CAVALLIN M120".

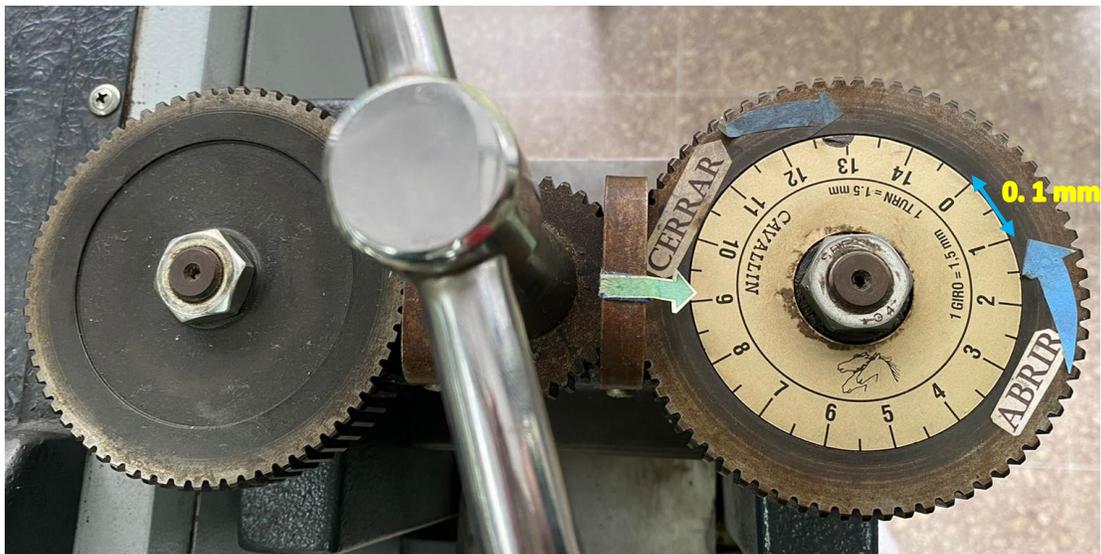
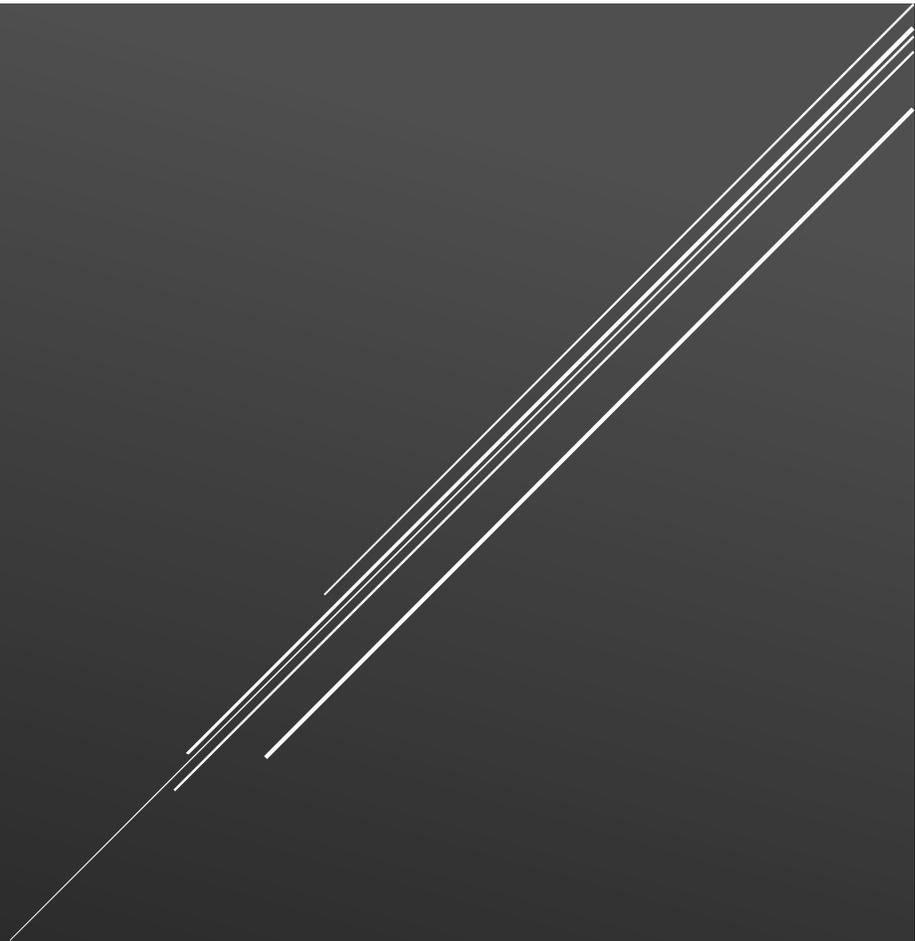


Figura 23. Referencia de la deformación aplicada.



RESULTADOS Y ANÁLISIS

Resultados

Los resultados obtenidos se presentan en cinco apartados que comprenden: preparación y limpieza de los residuos, caracterización morfológica y/o microestructural de los residuos, caracterización morfológica de los polvos cerámicos, análisis químico de los residuos de aluminio y los polvos cerámicos y fabricación y caracterización microestructural de los materiales compuestos.

I. Preparación y limpieza de los residuos

Un resumen de los procedimientos llevados a cabo se muestra en la tabla 5. Respecto a la limpieza realizada a las muestras de virutas y rebabas de aluminio, el procedimiento que presentó mejores resultados fue el sexto el cual incluye tres agentes, lauril sulfato de sodio líquido seguido del baño con bencina y concluyendo con alcohol isopropílico. Se observó que, con esta secuencia de limpieza, el líquido remanente ya no presentó precipitados ni turbidez por lo que se asume que la bencina mejora la limpieza de los residuos en relación a la acetona, la cual requirió de una mayor cantidad de baños para obtener el mismo nivel de limpieza. Las cantidades empleadas en el procedimiento seis fueron: un baño previo con lauril sulfato de sodio líquido, seguido de un baño con 30 mL de bencina para 5 g de rebaba de aluminio o viruta y, por último, un baño con 40 mL de alcohol isopropílico. Todos los baños se realizaron por un tiempo de 15 minutos hasta alcanzar resultados favorables.

Tabla 5. Combinaciones utilizadas para limpiar muestras de polvo y viruta de aluminio.

Procedimiento	Muestra	Limpieza en	Observaciones
1	Rebaba	Acetona	Coloración morada y turbidez en la acetona aún prevalece después de varios baños
	Viruta	Acetona	La acetona continuó incolora después del primer baño
2	Rebaba	Acetona + Alcohol Isopropílico	La acetona pasó a incolora después de 7 baños
	Viruta	Acetona + Alcohol Isopropílico	La acetona continuó incolora después del primer baño
3	Rebaba	Lauril sulfato de sodio líquido + Acetona + Alcohol Isopropílico	La acetona pasó a incolora después de 5 baños
	Viruta	Lauril sulfato de sodio líquido + Acetona + Alcohol Isopropílico	La acetona continuó incolora después del primer baño
4	Rebaba	Bencina	Coloración morada y turbidez en la acetona aún prevalece después de varios baños
	Viruta	Bencina	La bencina continuó incolora después del primer baño
5	Rebaba	Bencina + Alcohol Isopropílico	La bencina pasó a incolora después de 3 baños
	Viruta	Bencina + Alcohol Isopropílico	La bencina continuó incolora después del primer baño
6	Rebaba	Lauril sulfato de sodio líquido + Bencina + Alcohol Isopropílico	La bencina pasó a incolora después de 2 baños
	Viruta	Lauril sulfato de sodio líquido + Bencina + Alcohol Isopropílico	La bencina continuó incolora después del primer baño

Para corroborar el nivel de limpieza de los residuos, estos eran vertidos en un recipiente con agua tomando como indicador su separación o aglomeración; si gran parte del residuo metálico se mantenía aglomerado a la madera (como se aprecia en la figura 24) era un indicador de la presencia de aceites o lubricantes por lo que no se lograba la separación por diferencia de densidad, aún después de haber lavado el polvo con los diferentes solventes orgánicos.



Figura 24. Separación de rebaba de Al y madera mediante métodos gravimétricos, se puede apreciar una clara aglomeración en el fondo del vaso.

Cabe recalcar que todas las limpiezas concluían con el calentamiento de las muestras a fin de eliminar tanto impurezas como humedad. Debido a esto, se procedió a calcinar la muestra de rebaba por 15 minutos, dando como resultado la combustión de la madera (señaladas con círculos rojos en la figura 25), esto a una temperatura de 280°C.

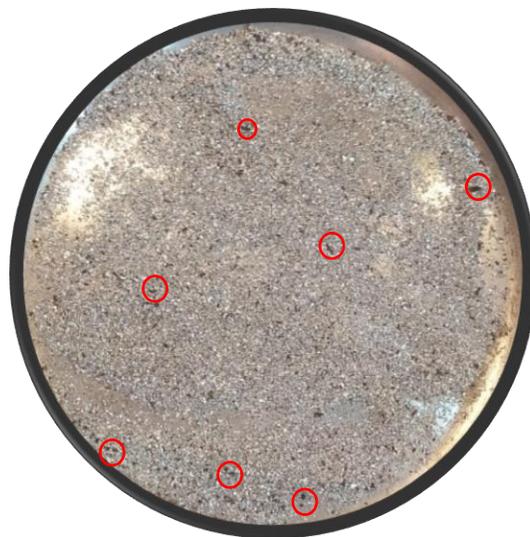


Figura 25. Muestra de polvo con aserrín siendo quemada, denotando la combustión del aserrín (partículas encerradas de rojo).

Analizando los resultados obtenidos en la tabla 5, nos podemos percatar que el residuo que presentaba una mayor suciedad, era la rebaba, ya que en todos los ciclos de limpieza con distintas sustancias a los que se sometió dicho residuo, siempre resultaba con una coloración morada en los líquidos residuales, lo anterior se adjudica a la fuente de procedencia de la rebaba, es decir, cortadoras de sierra, las cuales como se tiene conocimiento, necesitan estar bien lubricadas, el propósito de su lubricación es reducir la fricción de las cuchillas y al mismo tiempo reducir el calentamiento de las mismas. Es este lubricante el cual impregna por completo los residuos que se obtienen al cortar algún material (en este caso la rebaba de aluminio) el cual es muchas veces elaborado a base de aceites, mismos que producen una inmiscibilidad con agua, por lo que, no son tan fáciles de limpiar. Es por tal razón que se procedió a utilizar solventes orgánicos, como fue el caso de la bencina, acetona, alcohol isopropílico.

Además, se debe resaltar que el uso de lauril sulfato de sodio líquido dio aún mejores resultados, ya que, al tener una parte hidrófoba e hidrófila, pudo limpiar tanto las sustancias afines al agua como a grasas y aceites. Esto de manera más específica, funciona ya que esta sustancia química posee una cadena larga alifática o hidrocarbonada sin carga, misma que interactúa con la grasa, disolviéndola, mientras que la otra región o extremo que cuenta con carga se orienta hacia el exterior, formando gotas. Una vez que la superficie de la gota grasa está cubierta por muchas moléculas de lauril sulfato de sodio líquido, se forma una micela con una pequeña gota de grasa en el interior, dicha gota de grasa se dispersa fácilmente en el agua, ya que está cubierta por las cabezas con carga o aniones carboxilato del lauril sulfato de sodio líquido, esta mezcla que resulta de dos fases insolubles (agua y grasa), con una fase dispersada en la otra en forma de pequeñas gotas, se denomina emulsión, por lo tanto, se dice que la grasa ha sido emulsionada por la solución jabonosa. De esta manera, en el proceso de lavado con lauril sulfato de sodio líquido, la grasa se elimina con el agua del lavado, esto mismo fue lo que facilitó aún más la limpieza de la rebaba [31, 32].

Algo a destacar, es que tanto con la ruta de limpieza de la acetona como con la de bencina, arrojan resultados óptimos; el punto para decantarnos por una u otra sustancia fue que en el caso de la bencina se utilizaban menos baños para dar una limpieza completa que en el caso de la acetona. En el procedimiento con la bencina sólo se daban 3 baños en total, seguidos de uno con alcohol y otro con lauril sulfato de sodio líquido, mientras que en el caso de la acetona los baños eran 5 o incluso más, seguidos de uno con alcohol y otro con lauril sulfato de sodio líquido. Por otro lado, en el caso de la viruta, esta no presentaba grandes rastros de suciedad, por lo que, como podemos observar en la tabla 5, en todos los casos después del primer baño quedaba incolora la sustancia utilizada. Se puede decir que esta falta de suciedad se debió a que, en los tornos, normalmente no es necesario el uso de lubricantes o al menos no en la parte que está en contacto directo con el material a mecanizar o perforar.

Otro factor presente en la limpieza de la rebaba de aluminio fue que esta se encontraba mezclada con lo que parecía ser aserrín, este a pesar de intentar ser separado por medios gravimétricos como se observa en la figura 24, no dio resultado, ya que el material se aglomeraba en la parte inferior del vaso, debido principalmente a la presencia de grasas y/o aceites en el material. Se pudo constatar que el aceite no permitía que el agua entrara en contacto con el material (la rebaba de aluminio), por lo que, una vez que se tenía lavada la rebaba se procedía a calcinarla, dando como resultado lo mostrado en la figura 25, la combustión del aserrín, mismo que incluso posterior a la calcinación, el aserrín se fragilizó, por lo que, fue sencillo pulverizarlo, propiciando así una rebaba aún más limpia y libre de impurezas.

II. Caracterización morfológica y/o microestructural de los residuos

Las muestras ya limpias fueron montadas en frío y sometidas a preparación metalográfica convencional; los resultados se presentan en las figuras 26-33.

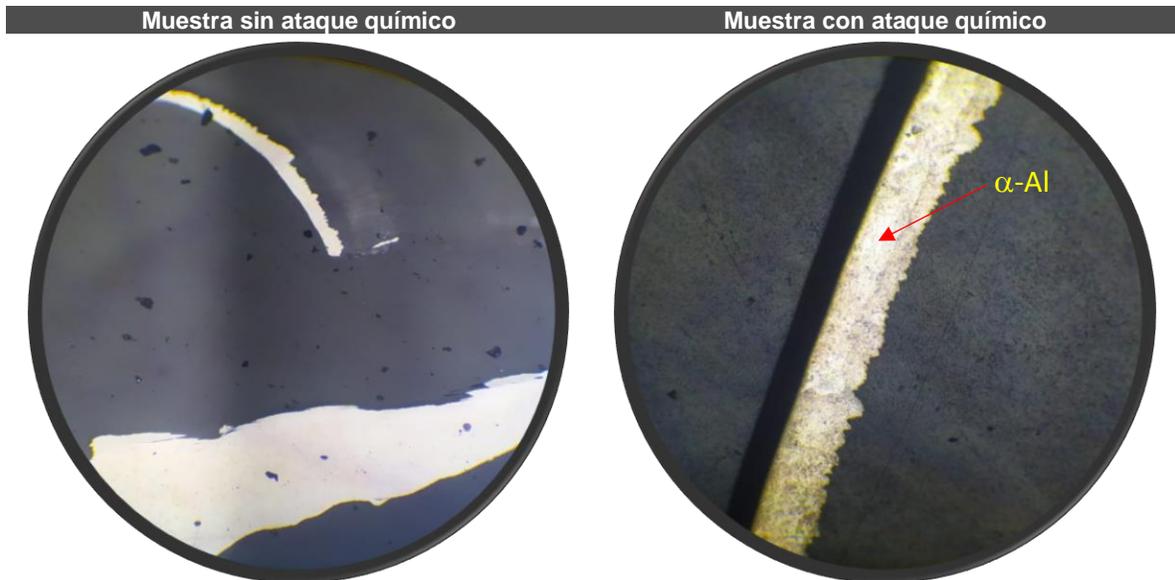


Figura 26. Muestra de viruta limpiada de acuerdo al procedimiento número 3 vista a 100X.

Figura 27. Muestra de viruta limpiada de acuerdo al procedimiento número 3 vista a 100X. Atacada con Keller

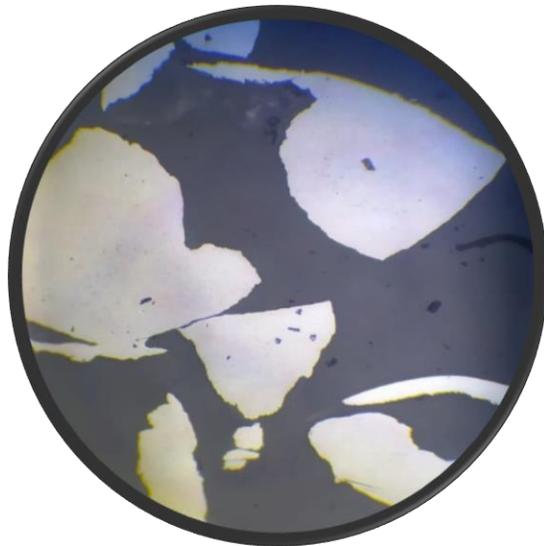


Figura 28. Muestra de rebaba limpiada de acuerdo al procedimiento número 3 vista a 100X.

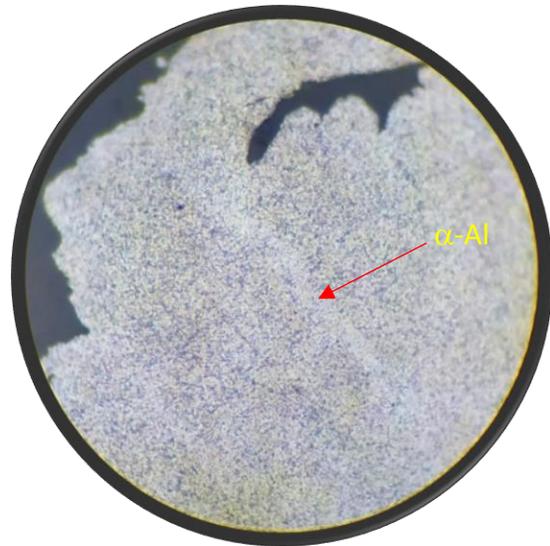


Figura 29. Muestra de rebaba limpiada de acuerdo al procedimiento número 3 vista a 100X. Atacada con Keller.

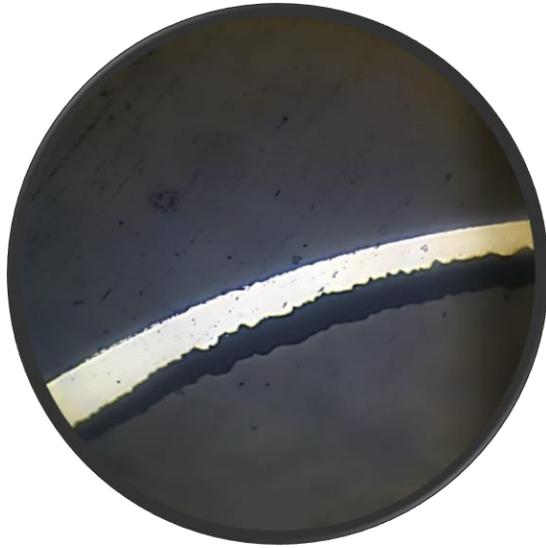


Figura 30. Muestra de viruta limpiada de acuerdo al procedimiento número 6 vista a 100X.

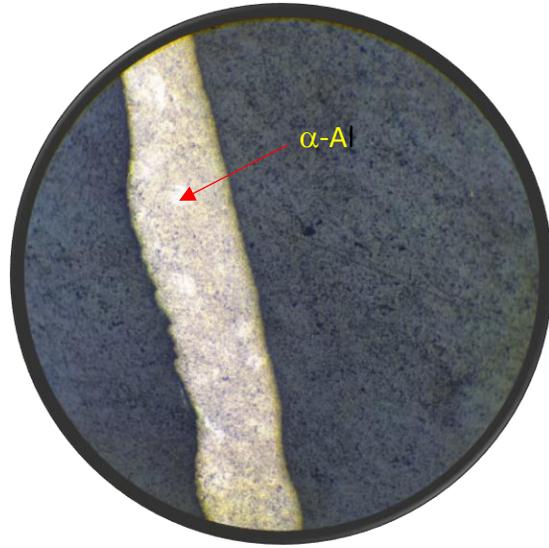


Figura 31. Muestra de viruta limpiada de acuerdo al procedimiento número 6 vista a 100X. Atacada químicamente con Keller.

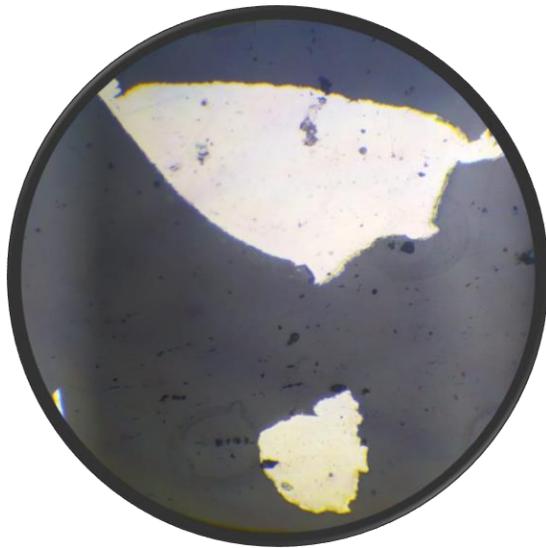


Figura 32. Muestra de rebaba limpiada de acuerdo al procedimiento número 6 vista a 100X.

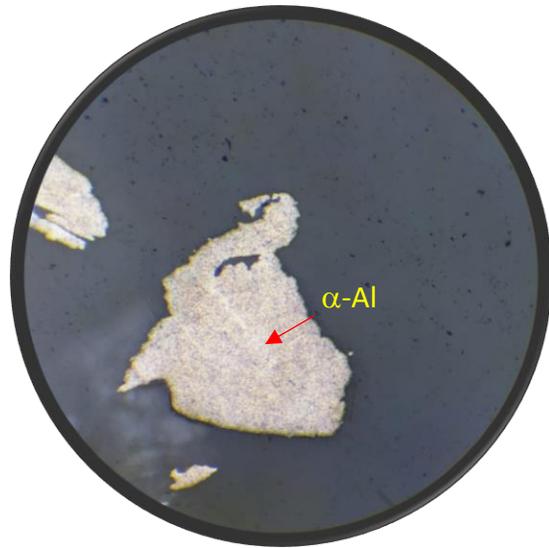


Figura 33. Muestra de rebaba limpiada de acuerdo al procedimiento número 6 vista a 100X. Atacada con Keller.

Por otra parte, las figuras 26 a la 33, son las muestras limpiadas, mismas que como podemos apreciar denotan características muy similares entre ellas, presentando un ataque similar que denota la fase alfa-aluminio. De estas microestructuras, la que más resalta es la mostrada en la figura 29, la cual representa a la rebaba limpiada con acetona + alcohol isopropílico, en ella se alcanzan a ver diferentes tonalidades de colores, a diferencia de las demás muestras limpiadas, muy

posiblemente debido a una falta de limpieza en dicha muestra, ya que si recordamos, la rebaba es el residuo que presentó una mayor contaminación en cuanto a presencia de grasas y/o aceites, por lo tanto, es muy posible que la muestra representativa no haya quedado del todo limpia; este resultado se atribuye al uso de la acetona, ya que como sabemos, esta fue el disolvente menos efectivo en cuanto a la limpieza del material.

III. Caracterización morfológica de los polvos cerámicos

Las figuras 34 y 35 muestran las micrografías de las muestras estudiadas, así como los histogramas de los parámetros cuantificados para los polvos cerámicos utilizados, SiC y WC.

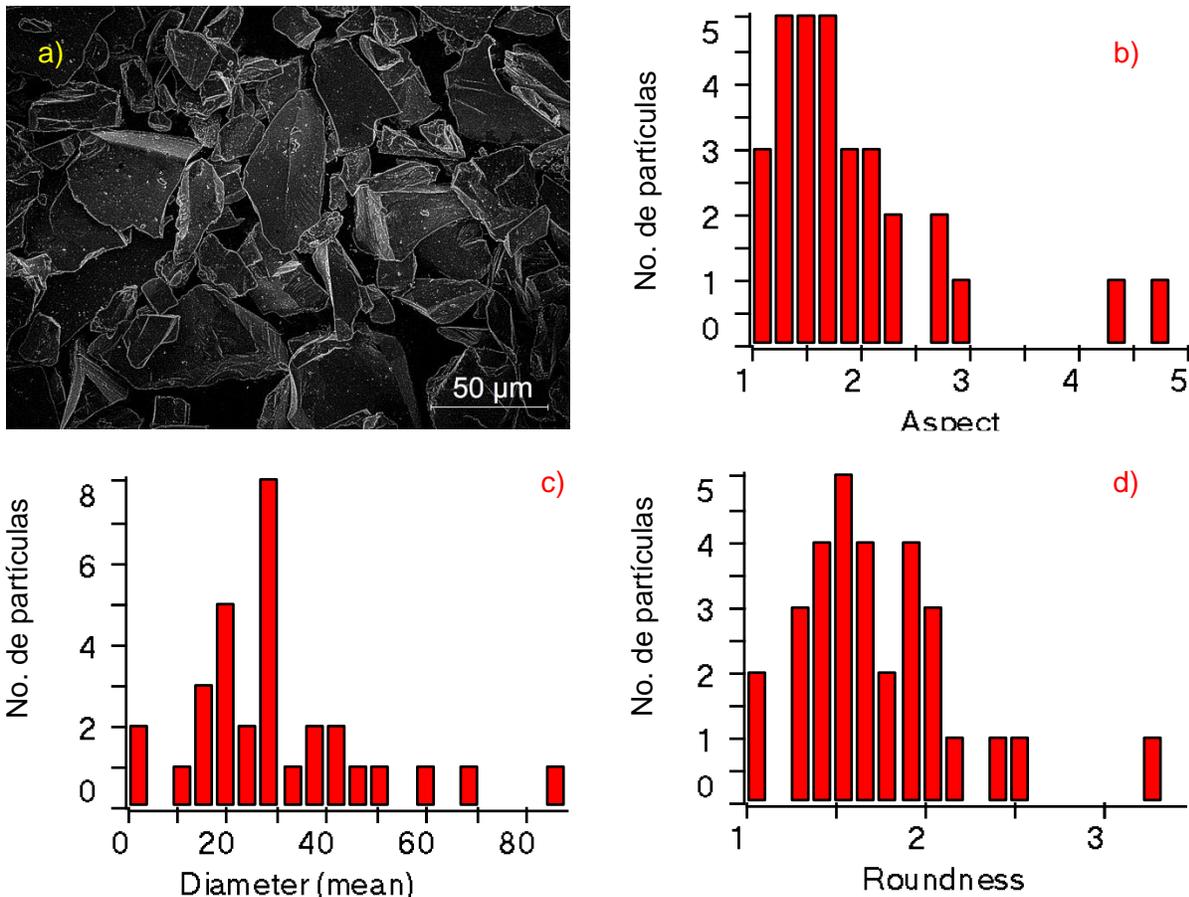


Figura 34. Micrografías de los a) polvos de carburo de silicio; b) relación de aspecto; c) diámetro medio y, d) redondez de las partículas.

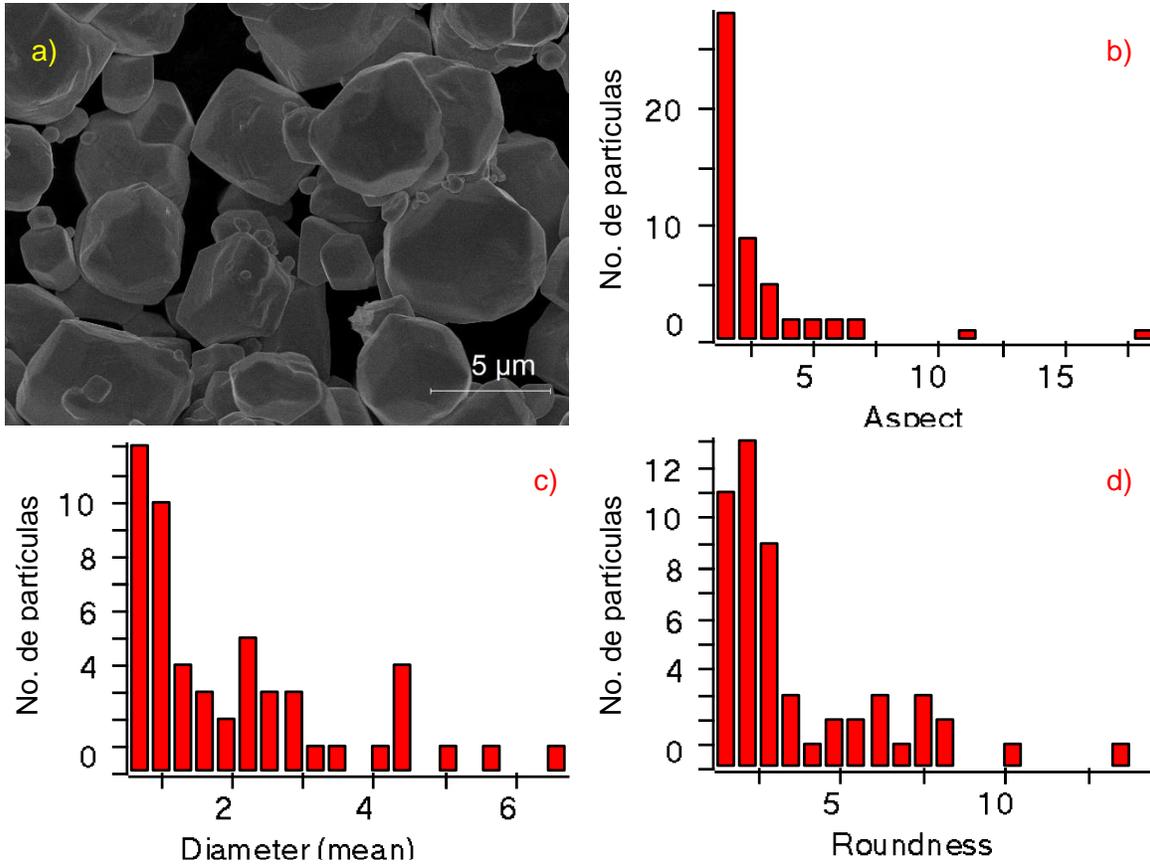


Figura 35. Micrografías de los a) polvos de carburo de tungsteno; b) relación de aspecto; c) diámetro medio y, d) redondez de las partículas.

Por otra parte, las figuras 34 y 35 representan imágenes tomadas con MEB, para los polvos cerámicos, siendo SiC y WC respectivamente, estas imágenes están acompañadas de histogramas, con el fin de obtener una mejor caracterización de los polvos. En el caso del SiC podemos identificar como la distribución de aspecto, de acuerdo con el histograma que lo representa (34b), es muy variada, valores mayores a uno indican que las partículas están alargadas en cierto extremo, en cambio si estas fueran 1 significaría que son totalmente redondas, en este caso sí existen partículas con aspecto igual a 1 pero la mayoría supera dicho número. Estos valores nos señalan una distribución variada en cuanto a la geometría, lo cual ayuda en el acomodo de las partículas durante la fabricación de los materiales compuestos, ya que como se ha mencionado, una distribución de forma y tamaño abierto permiten que las probetas queden mejor unificadas y sin espacios vacíos entre las partículas que las conforman; algo similar ocurre con el diámetro y la

redondez presentada, la cual en el SiC es un rango abierto lo que se muestran en los histogramas (figura 34). Estos resultados contribuirán a obtener a una mayor y mejor ocupación de los espacios que lleguen a quedar vacíos en las probetas.

Algo similar ocurre en el caso del WC (figura 35), ya que analizando los histogramas presentados, estos muestran una distribución cerrada en cuanto a aspecto, diámetro y redondez de las partículas, caso contrario al SiC, ya que el WC denota un aspecto casi en su mayoría igual a 1, su diámetro promedio en su mayoría es igual o cercano a 1 y su redondez se encuentra alrededor de 2.5, es decir, aquí las partículas son más similares en cuanto a dichas variables entre sí, esto provocaría la presencia de espacios vacíos dentro de los compuestos realizados, cosa que al final no se busca, ya que interfiere con la unificación del material, que incluso en los peores casos podría terminar con un resultado de una pieza porosa o que incluso al momento de sinterizar no se lleven a cabo los procesos de difusión necesarios dejando así una pieza totalmente inservible.

IV. Análisis químico de los residuos de aluminio y los polvos cerámicos

Aunado a la caracterización morfológica se realizó un análisis semicuantitativo de los refuerzos cerámicos SiC y WC con el fin de determinar su composición química.

La obtención de SiC y WC se da a partir del óxido de silicio y carbono, muchas veces formando una película de sílice. El resultado del microanálisis realizado a las partículas de SiC (figura 36) muestra únicamente la presencia de dos elementos: carbono y silicio (véase en la Tabla 6).

Tabla 6. Espectro del microanálisis de las partículas de carburo de silicio.

Elemento	% (peso)
C	27.99
Si	72.01
Total	100

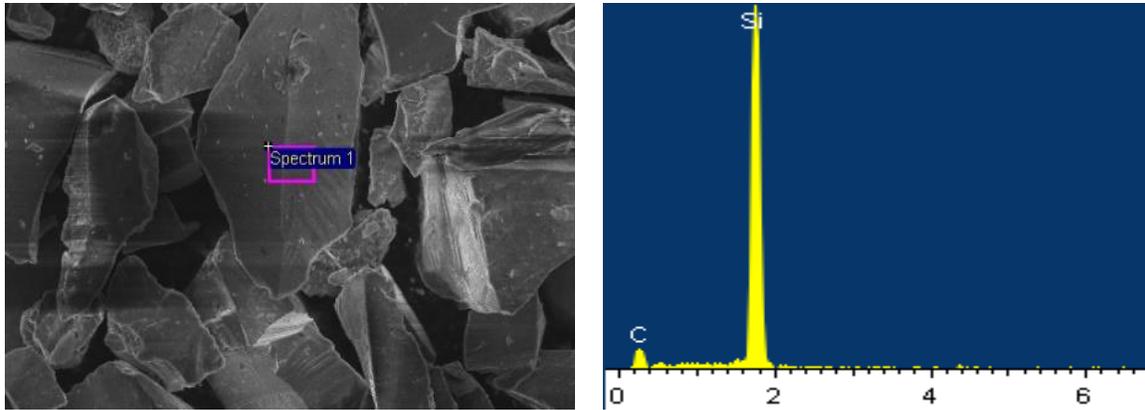


Figura 36. Espectro de microanálisis realizado a partículas de SiC.

En la figura 37 se muestran partículas de carburo de tungsteno; el proceso de obtención de estas es mediante carburación con el cual se obtiene una morfología semiesférica o irregular. El microanálisis realizado a las partículas de carburo de tungsteno se reporta en la tabla 7.

Tabla 7. Espectro del microanálisis de las partículas de carburo de tungsteno.

Elemento	% (peso)
C	34.73
W	65.27
Total	100

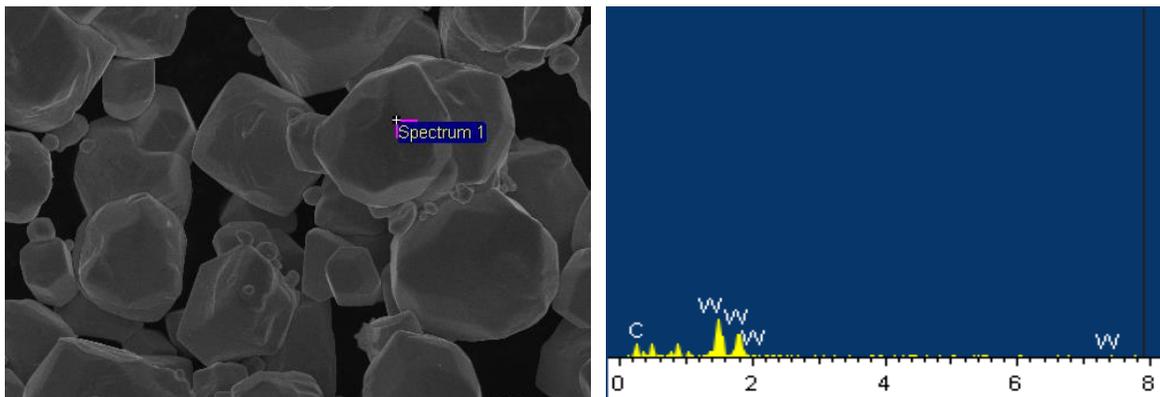


Figura 37. Espectro de microanálisis realizado a partículas de WC.

Por último, la tabla 8 muestra el análisis químico elemental de las materias primas empleadas (residuos y polvos cerámicos) mediante fluorescencia de rayos X.

Tabla 8. Composición química de residuos y polvos cerámicos obtenidos por fluorescencia de RX.

	Zr	Cu	Ni	Fe	Mn	V	Ti	Ca					
SiC (ppm)	269.48	56.55	116.94	5786.58	190.46	183.66	195.27	3976.19					
SiC (%)	0.03	0.01	0.01	0.58	0.02	0.02	0.02	0.40					
	Zn	Cu	Fe	Mn	Cr	Ca							
Al rebaba (ppm)	137.34	210.88	1369.59	150.29	189.86	7547.3							
Al rebaba (%)	0.01373	0.02109	0.13696	0.01503	0.018986	0.7547							
	Zn	Cu	Fe	Mn	Cr	Ca							
Al viruta (ppm)	165.58	2982.64	1864.06	204.19	613.94	4534.7							
Al rebaba (%)	0.01656	0.29826	0.18641	0.02042	0.061394	0.4535							
	Mo	Pb	Hg	Zn	W	Cr	Ca	K	Cs	Sn	Cd	Ag	Pd
WC (ppm)	3064.91	326.58	9413.75	9176.33	1949267.3	319.87	4812.27	707.34	62.74	166.49	70.43	222.27	145.51
Al rebaba (%)	0.30649	0.03266	0.94138	0.91763	194.92673	0.032	0.48123	0.07073	0.006274	0.016649	0.007	0.02223	0.01455

En cuanto a las tablas 6 y 7 junto con las figuras 36 y 37, estas pertenecen a los polvos cerámicos, SiC y WC respectivamente, dichos resultados muestran análisis puntuales en estos polvos, obteniendo así la composición química presente en dicho lugar. En el caso del SiC tabla 6 y figura 36, los análisis resaltan solamente la presencia de carbono y silicio, aunque se debe aclarar que existe la probabilidad de que se tengan más elementos o compuestos, por ejemplo, óxido de silicio, la presencia de este óxido se debe a que de este se obtiene el SiC; el proceso de fabricación consiste en combinar arena de sílice y carbón a altas temperaturas en un horno de resistencia entre 1600°C y 2500°C [34]. Una cuestión para destacar es que el análisis realizado es puntual, por lo que no nos muestra la composición química en general, sino sólo en una zona específica. Comparando estos análisis con los mostrados en la tabla 8, podemos apreciar que, en efecto, hay una presencia

de más elementos a parte del C y Si, entre ellos resaltando el Fe y Ca, los cuales se encuentran en 0.58% y 0.40%, una composición alta e inusual. Fuera de esto los demás elementos que fueron encontrados por dicho análisis son sólo trazas. La causa de su presencia es por contaminación durante su almacenamiento o por la procedencia del óxido de silicio, ya que, se sabe que este compuesto en ocasiones este se encuentra presente en escorias o subproductos en la producción de otros metales como de hierros colados, por lo que si este óxido fue tomado de algún tipo de escoria respondería el porqué de la presencia de más elementos (aparte del Fe) en la composición química del SiC.

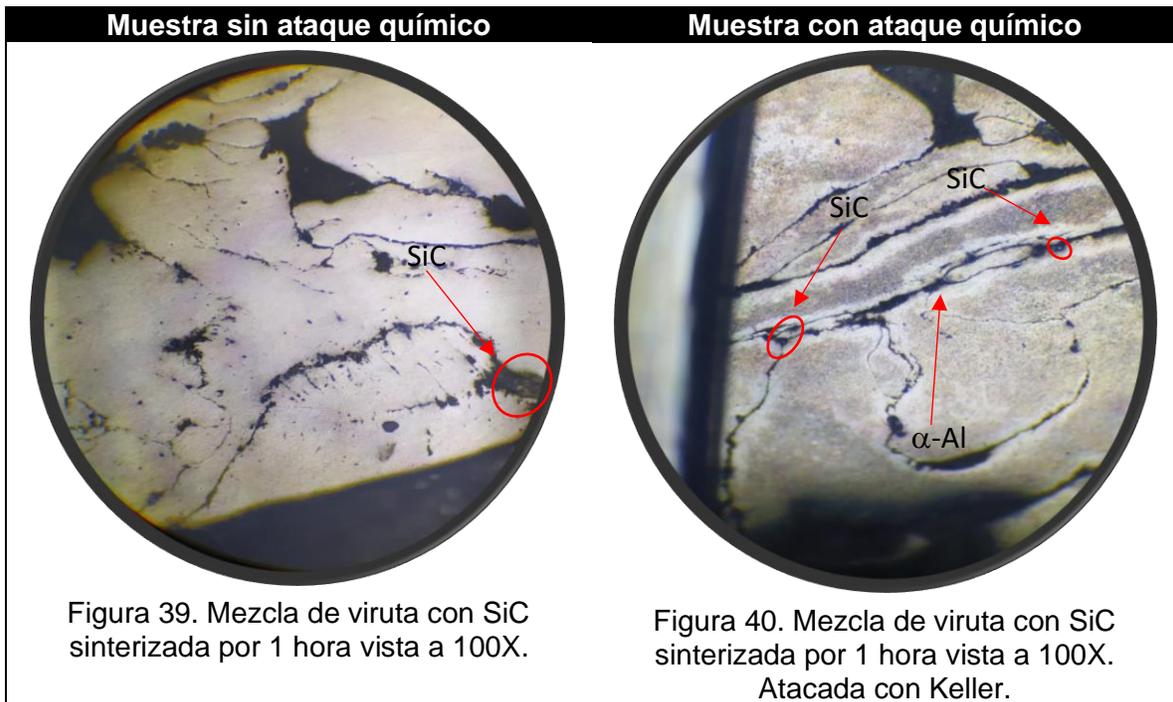
En el caso de los análisis puntuales para el WC_P, estos denotan, al igual que con el SiC_P, la única presencia de carbono y tungsteno, aunque nuevamente hay que recalcar que al ser análisis realizados en una sola zona no podrían ser considerados como representativos de toda la composición química del polvo cerámico. Al mismo tiempo, en la tabla 8, se presenta también la composición química obtenida mediante fluorescencia de rayos x, misma en la que resaltan los elementos Hg, Zn y Ca, con cantidades de 0.94%, 0.92% y 0.48% respectivamente.

V. Fabricación del material compuesto y caracterización microestructural de los materiales compuestos.

Una vez que se obtuvieron las muestras de polvo y viruta de aluminio limpias y realizado el mezclado o el aleado mecánico de acuerdo al material, se procedió a realizar las probetas del material compuesto (Al + 5% SiC_P o WC_P) con las condiciones mencionadas en la tabla 3, obteniendo así los siguientes resultados mostrados en la figura 38. En esta figura se aprecia la forma final del compuesto empleando las condiciones reportadas en la literatura. En las figuras 39 a la 46, se observa la microestructura con y sin revelado químico de los materiales compuestos generados bajo las condiciones mencionadas.



Figura 38. Diferentes perspectivas de las probetas realizadas con viruta de aluminio.



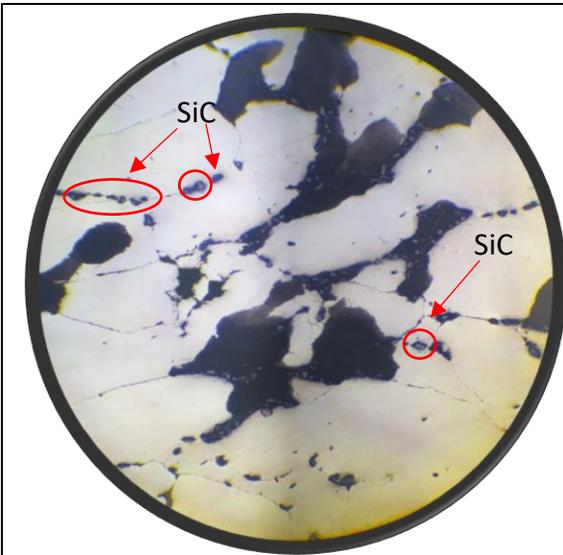


Figura 41. Mezcla de rebaba con SiC sinterizada por 1 hora vista a 100X.

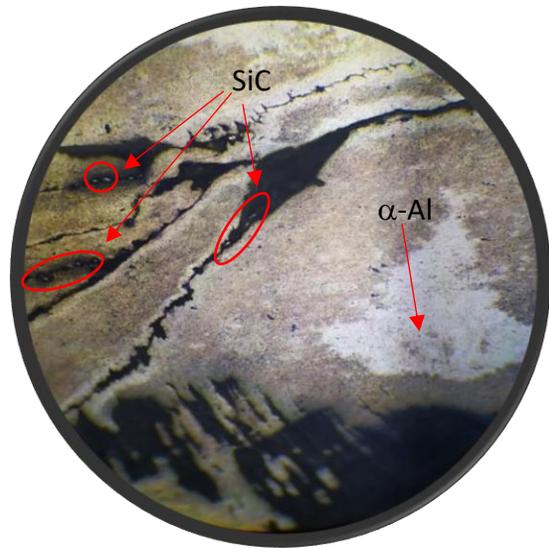


Figura 42. Mezcla de rebaba con SiC sinterizada por 1 hora vista a 100X. Atacada con Keller.

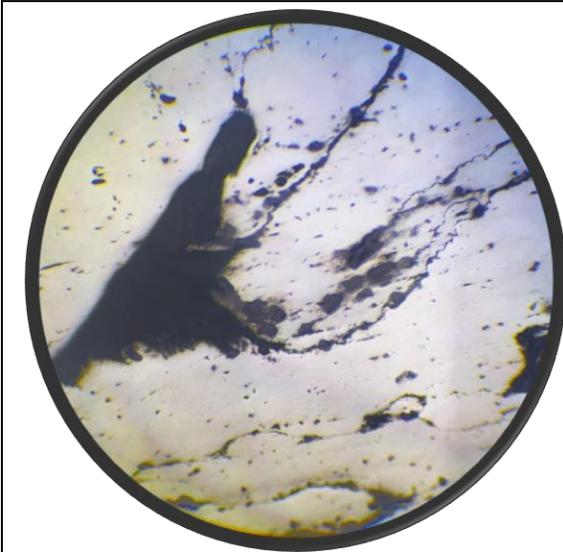


Figura 43. Mezcla de viruta con SiC sinterizada por 2 horas vista a 100X.

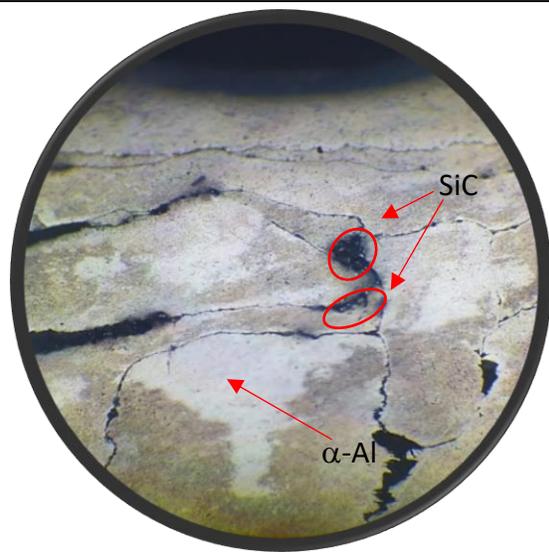
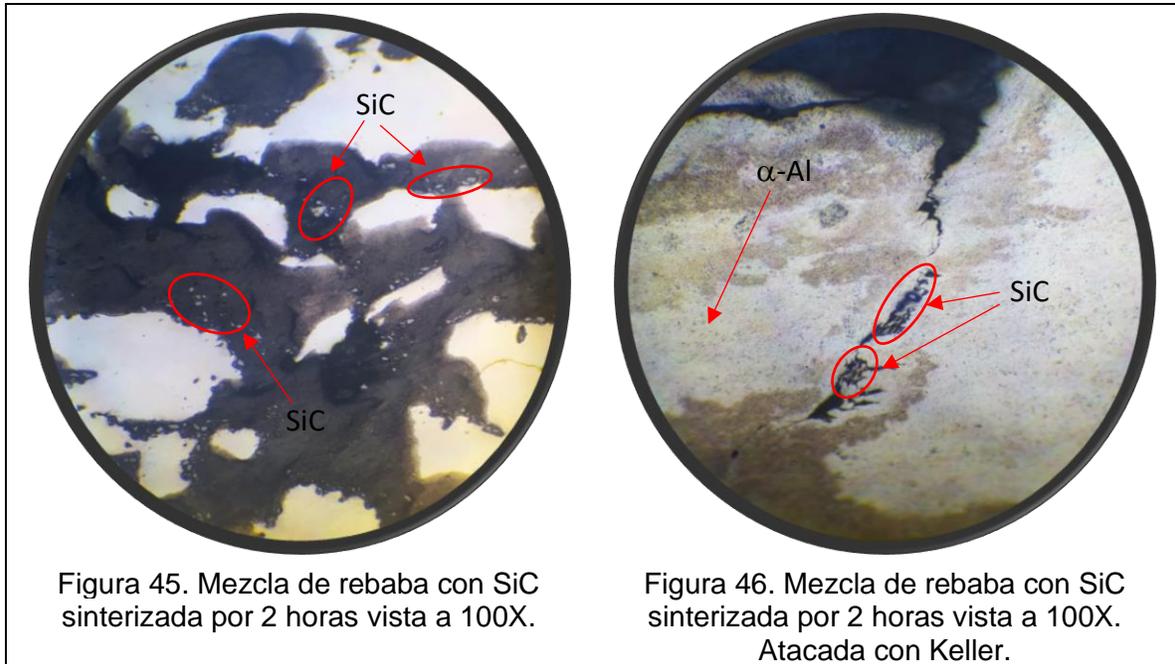


Figura 44. Mezcla de viruta con SiC sinterizada por 2 horas vista a 100X. Atacada con Keller.



Las figuras presentadas anteriormente (figuras 39 a 46), son la representación de las probetas obtenidas de aluminio reforzadas con SiC_P, tanto de rebaba como de viruta, y, lo primero que podemos resaltar en ellas, son las zonas totalmente oscuras que se alcanzan a ver prácticamente en todas las metalografías, dichas zonas representan una separación entre el material, tanto de la rebaba como de la viruta de aluminio, esta separación pudo haber ocurrido debido a tres factores principalmente: 1. Una fuerza de compactación inadecuada. Es decir, que la fuerza de compresión en cada una de las probetas no haya sido la suficiente para comprimir de manera adecuada la rebaba y la viruta, 2. Una temperatura de sinterizado baja y 3. Tiempo inadecuado de permanencia en el horno para llevar a cabo la sinterización de los compósitos. Con estas pruebas preliminares se cree que la variable principal del porqué la unificación del material no se haya llevado a cabo de manera ideal fue la falta de carga en la compactación de las piezas, ya que estas desde un principio presentaban una separación considerable entre los materiales, principalmente en las probetas de viruta, esto lo podemos apreciar en la figura 43, donde a simple vista se logra observar como varios trozos de viruta están separados; esta misma separación provocó que al momento de ser sinterizadas las

piezas en verde, no se alcanzara la unificación debido al pobre contacto entre las virutas que conforman la pieza, aunado a que tampoco se encontraban lo suficientemente cercanas para provocar los procesos de difusión como lo son el transporte de masa en fase sólida y vapor entre el material que conformaba las piezas [19]. Otros factores que pudieron haber influido en la separación del material son: 1. La presencia de aire al momento de comprimir las muestras, el cual pudo haber quedado atrapado dentro del material, provocando que la pieza no se consolidará de manera ideal, 2. Tamaño del material similar entre sí, esto lo podemos asociar a que al momento de comprimir las muestras es mayor la cantidad de espacios que quedan libres entre el material si este es de un mismo tamaño, ya que de lo contrario, las partículas más pequeñas ocuparían los espacios libres que se lleguen a generar [15]. Esto mismo explicaría el porqué de que el material de refuerzo sólo se logre apreciar en dichos espacios, puesto que al ser partículas con menor tamaño éstas quedaron atrapadas en dichos huecos.

De igual forma, en las microestructuras mostradas (figuras 39 a 46) sin excepción, notamos en una, poca presencia del SiC debido posiblemente al tiempo de mezclado (en el caso de la rebaba) y al poco tiempo de aleado mecánico (en el caso de la viruta). Además, a esto se agrega el hecho de que es posible que las partículas sólo haya rellenado los huecos presentes en el material. Otra cosa importante para destacar y notable es que aquellas piezas con un mayor tiempo de sinterizado de manera microestructural denotan una menor separación entre el material que lo conforma, dándonos a entender que el tiempo de permanencia es de suma importancia, ya que al igual que en la distancia entre el material, el tiempo es otra de las variables significativas en los procesos de difusión, afectando de manera directa dichos procesos.

En el caso de la rebaba, el SiC_P se notaba en la parte central de la pieza, mismo lugar donde parecía haberse acumulado todo el material de refuerzo, provocando que al momento de ser preparada metalográficamente este se desprendiera dejando separaciones similares a las que se ven en la figura 38, esto a causa de la mala distribución del material por el poco tiempo de mezclado (15 minutos) y a la

poca compactación que tuvo la rebaba. En cuanto a la viruta, a esta se le aplicó un aleado mecánico, que consistió en introducir dentro de un molino de bolas construido la mezcla de materiales, sin embargo, en vez de triturarse lo suficiente sólo se doblaba un poco, debido a la ductilidad del aluminio. La adición e integración con SiC_P fue con el objetivo de que funcionara como abrasivo dentro del molino junto con la viruta, para intentar que el desgaste de la viruta fuera mayor pero contrario a esto, lo que se obtuvo fue un aleado mecánico de ambos materiales, por lo que se prosiguió a seguir este método, el cual consideramos fue bueno pero necesita de un mayor tiempo para dar resultados ideales, es decir, que la cantidad de refuerzo se adhiera por completo a la viruta. Algo a destacar es que se debe de considerar que estas imágenes (figuras 39 – 46) fueron pruebas con el fin de establecer de mejor manera las variables a estudiar, analizando qué factores afectaban más o menos a la hora de realizar nuestros materiales compuestos.

Con los resultados obtenidos se decidió modificar el valor de las variables de proceso a cuantificar, por lo que se procedió a generar un diseño factorial que permita estudiar los efectos que varias variables (también llamados factores) pueden tener en una respuesta.

Este diseño se ha seleccionado ya que, al permitir la variación de los niveles de todos los factores al mismo tiempo en lugar de uno a la vez, se puede estudiar las interacciones entre estos. Este diseño se reporta en la tabla 9.

Tabla 9. Diseño factorial del experimento para un compósito 6061/SiC_P o WC_P.

Muestra	X ₁		X ₂		X ₃	
1	15	(-)	530	(-)	60	(-)
2	15	(-)	530	(-)	120	(+)
3	15	(-)	580	(+)	60	(-)
4	15	(-)	580	(+)	120	(+)
5	30	P. C.	550	P.C.	90	P.C.
6	45	(+)	530	(-)	60	(-)
7	45	(+)	530	(-)	120	(+)
8	45	(+)	580	(+)	60	(-)
9	45	(+)	580	(+)	120	(+)

donde:

X_1 = tiempo de mezclado (15, 30 y 45 min) o tiempo de aleado mecánico (30, 45 y 60 min)

X_2 = temperatura de sinterizado (530, 550 y 580° C)

X_3 = tiempo de sinterizado (60, 90 y 120 minutos)

Empleando las condiciones de la tabla 9, se procedió a repetir la fabricación y caracterización de los compósitos obteniéndose muestras con mejor apariencia tanto a nivel macroscópico (figura 47) como microscópico (figuras 48 y 49), además de análisis puntuales de estas últimas figuras (tablas 10 y 11).

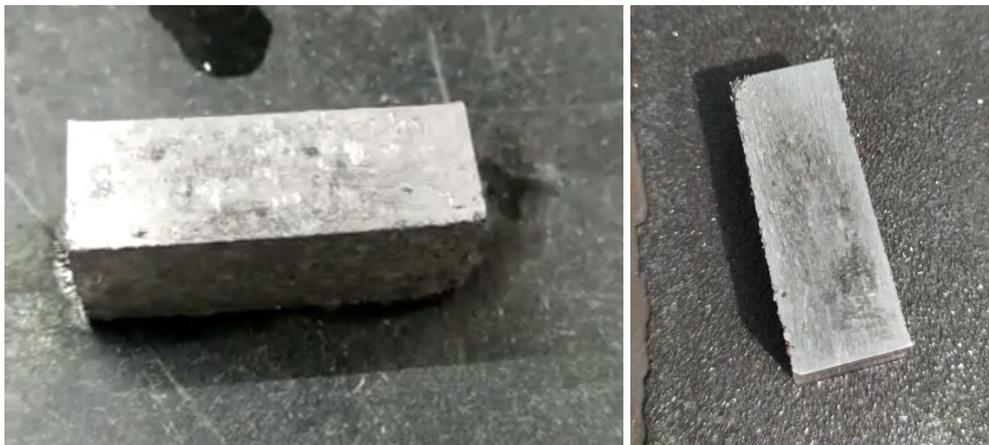


Figura 47. Compuestos fabricados con las nuevas especificaciones.

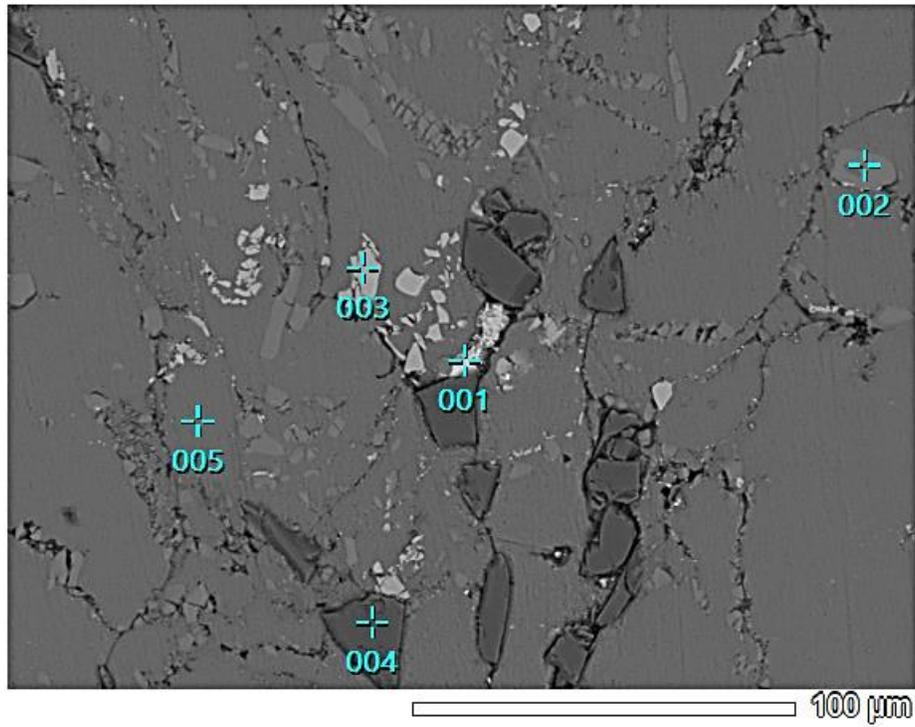


Figura 48. Caracterización puntual por medio de MEB para las muestras con nuevas especificaciones.

Tabla 10. Elementos presentados en un análisis químico puntual mediante MEB (figura 48) para un compuesto 6061/SiC_p.

Puntos	Elementos presentes												
	C	O	Mg	Al	Si	Cl	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn
001	0.7532	29.1355	0.3784	0.9703	0.7978	0.1072	0.2731	-	0.1133	2.6886	63.9941	0.7883	-
002	0.2387	0.3850	-	12.6239	86.7533	-	-	-	-	-	-	-	-
003	0.2416	1.0820	0.0115	56.2393	5.7110	-	-	0.0798	3.0801	8.1710	23.5360	1.8476	-
004	2.7598	0.6779	-	0.8331	95.5936	-	-	0.0440	-	-	0.0014	0.0399	0.0504
005	0.0922	1.3687	-	96.0979	0.4759	-	-	0.0835	0.1158	-	-	1.2117	0.5543

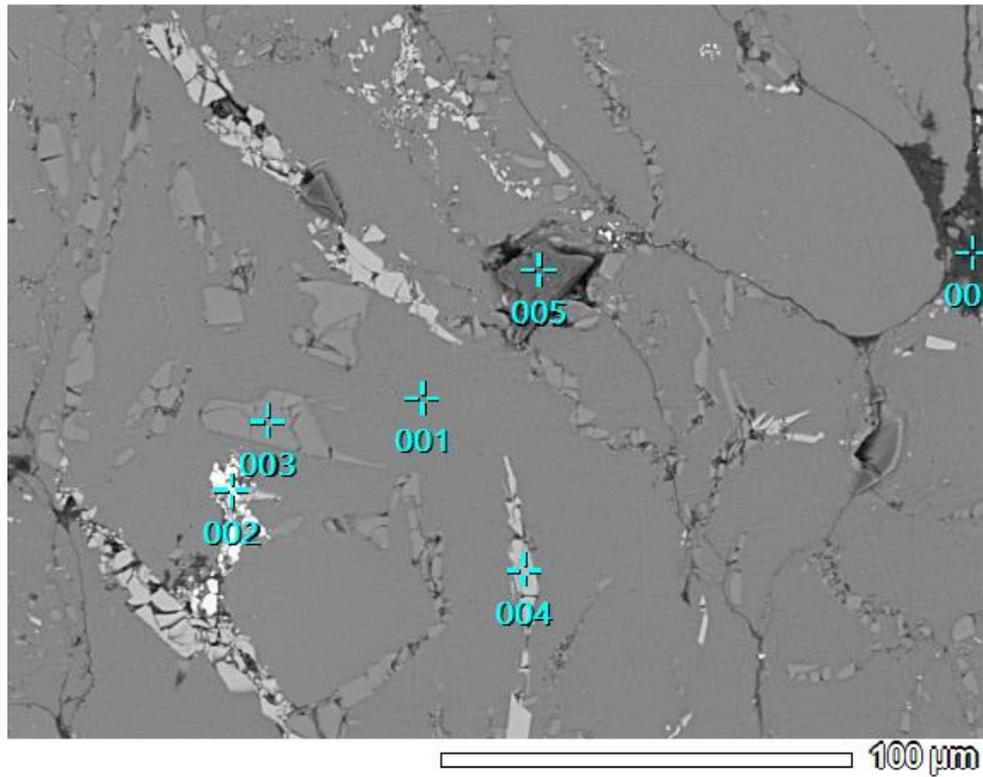


Figura 49. Caracterización por medio de MEB para las muestras con nuevas especificaciones.

Tabla 11. Elementos presentados en un análisis químico puntual mediante MEB (figura 49) para un compuesto 6061/SiC_P.

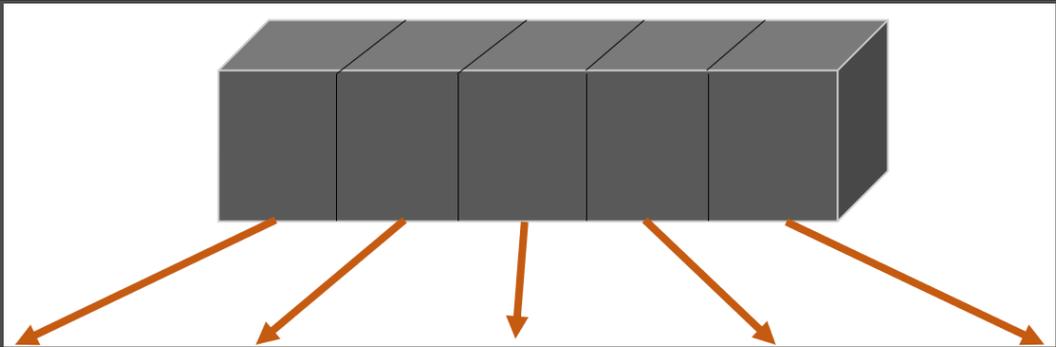
Puntos	Elementos presentes										
	C	O	Mg	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn
001	0.1054	0.9215	-	96.9869	0.3569	0.0121	-	0.0635	0.0467	1.1473	0.3595
002	0.5550	1.5646	-	39.4697	0.3020	-	0.1304	-	1.1127	55.6440	1.2215
003	0.2241	0.3068	0.0466	1.3923	97.5423	0.0690	0.0119	-	-	0.3833	0.0237
004	0.2081	1.0377	-	56.9605	10.3932	-	0.0972	3.4248	27.5525	-	0.3260
005	3.0026	0.3623	0.0134	0.9540	95.3027	0.0111	0.0483	-	0.0943	0.2112	-
006	0.3694	69.5209	0.4460	27.7523	1.4128	0.0238	0.0008	0.0888	0.1973	0.1878	-

Al comparar los datos presentados para viruta y rebaba de aluminio en la Tabla 8, obtenidos mediante fluorescencia de rayos X, nos indica que la composición de nuestros residuos se encuentran dentro de los rangos máximos establecidos, de acuerdo con la norma “ASTM B 308/308M-10” [30], aunque hay elementos que no llegan al rango de la cantidad requerida, como es el caso de cobre y el cromo, lo cual se podría adjudicar a una falla en el balance de cargas al momento de realizar la aleación. De igual forma y de manera general no existe problema alguno en cuanto a impurezas de otros elementos en dichos residuos; el único elemento encontrado y que no se presenta en la tabla 8 es el Ca, mismo que de acuerdo con el libro “*ASM Handbook: Volume 15*” [33] es posible ser encontrarlo en aleaciones base aluminio, aunque, en cantidades mayores a 0.005%, puede llegar a afectar negativamente la ductilidad en aluminio y magnesio. Otro efecto de su presencia es que podría afectar o modificar de manera mínima el punto eutéctico del sistema aluminio-silicio, esto último podría presentarse, puesto que de acuerdo con la Tabla 8 la cantidad de Ca supera el 0.005%.

Una vez que se tuvieron los parámetros claros a trabajar se procedieron a realizar más probetas siguiendo el diseño factorial de la tabla 9, dando como resultados probetas similares a las mostradas en la figura 47, dichas probetas fueron llevadas a MEB, obteniendo así las imágenes mostradas en las figuras 48 y 49, junto con los análisis puntuales denotados en la tabla 10 y 11, correspondientes a probetas con 1 y 2 horas de sinterizado respectivamente. En dichas figuras y tablas lo que podemos notar es la presencia de varios elementos, así como compuestos, pero sobre todo partículas que de acuerdo con los análisis puntuales correspondería a SiC, por lo que se obtuvieron piezas mejor consolidadas a las mostradas en las figuras 39 – 46. Cabe destacar que la diferencia entre las horas de sinterizado provocó una notoria respuesta en términos microestructurales ya que, a diferencia de estas, la pieza que fue sinterizada sólo una hora muestra aún cierta separación entre las partículas que la conforman. Por su parte, la pieza sinterizada por dos horas no muestra dicho efecto, al contrario, parece ser una pieza más continua. Estos resultados nos lleva a pronosticar que se pueden obtener materiales compuestos de buena calidad partiendo de residuos metálicos.

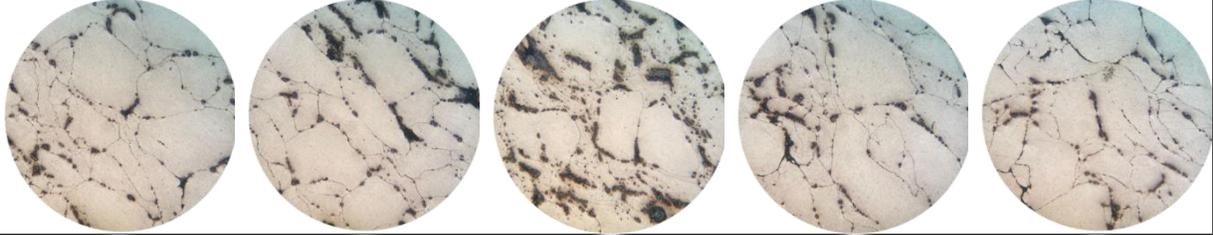
Una vez realizadas las pruebas preliminares, se procedió a fabricar muestras siguiendo el diseño factorial planteado con anterioridad (véase en la tabla 9). Las muestras obtenidas se muestran en la tabla 12; cada ejemplar se dividió en cinco cuadrantes, de los cuales se obtuvieron las siguientes micrografías.

Tabla 12. Micrografías tomadas a 100X mediante MO, obtenidas por cada uno de los cinco cuadrantes para un compósitos 6061/SiC_P y 6061/WC_P.



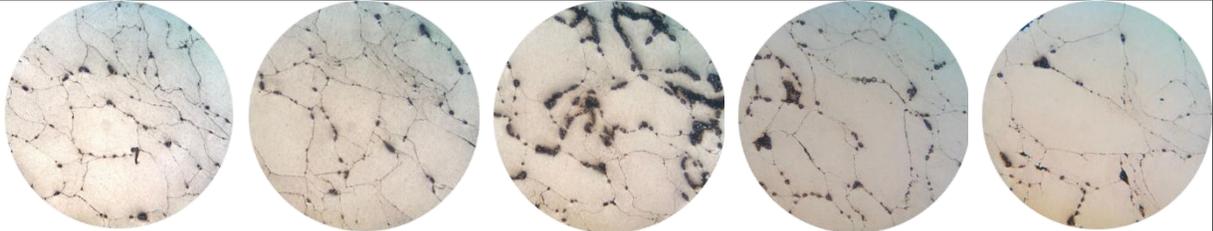
Material de refuerzo	Condiciones experimentales			Cuadrantes				
	X ₁	X ₂	X ₃	1	2	3	4	5
SiC	(-)	(-)	A					
			B					
	(-)	(+) (+)	C					
			D					
	(+) (+)	(-)	E					
			F					

D
(+)



P.C. P.C. P.C.

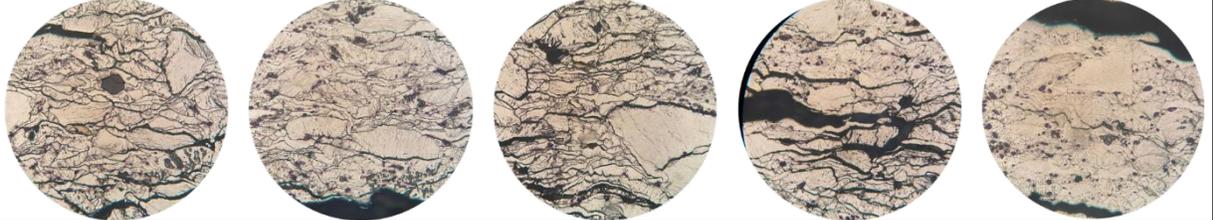
E



F
(-)
(-)

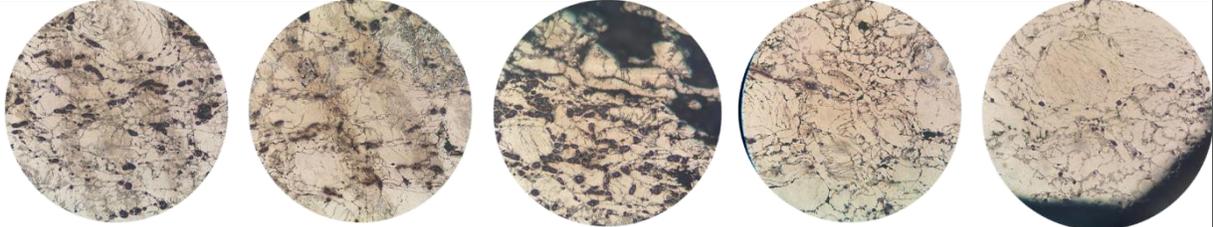


G
(+)



(+)

H



(+)

I

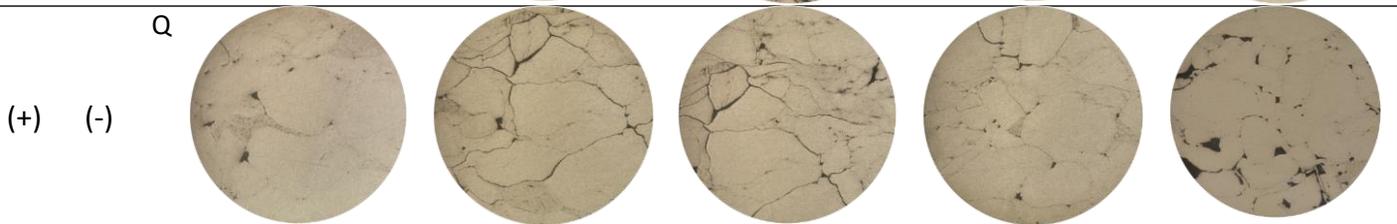
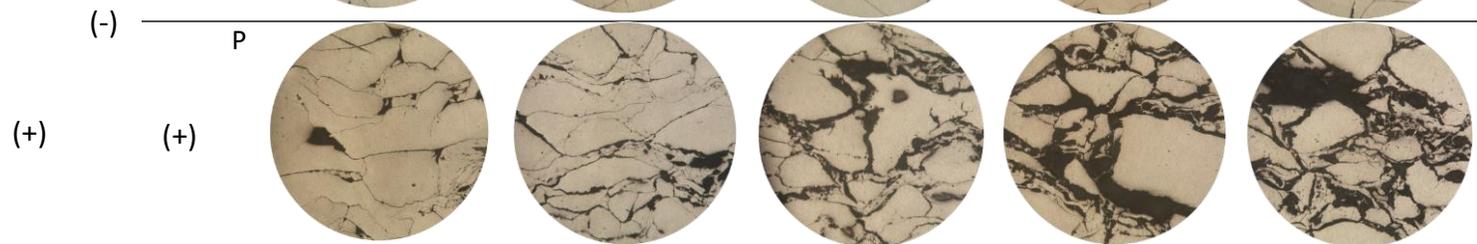
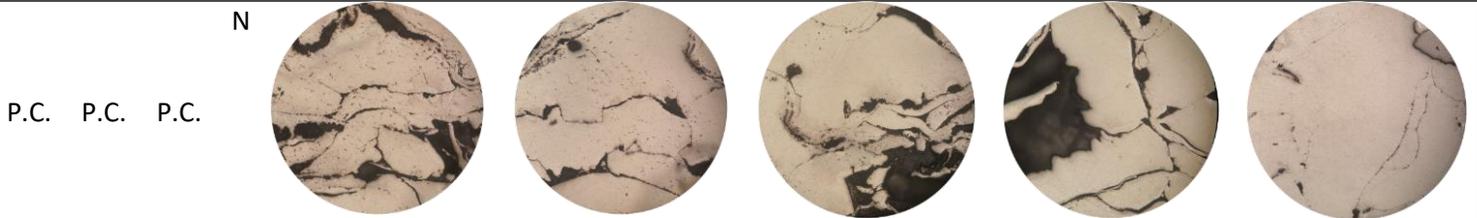
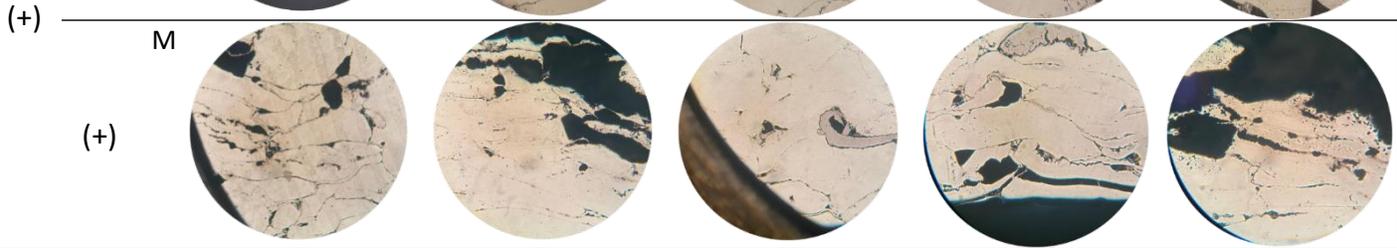
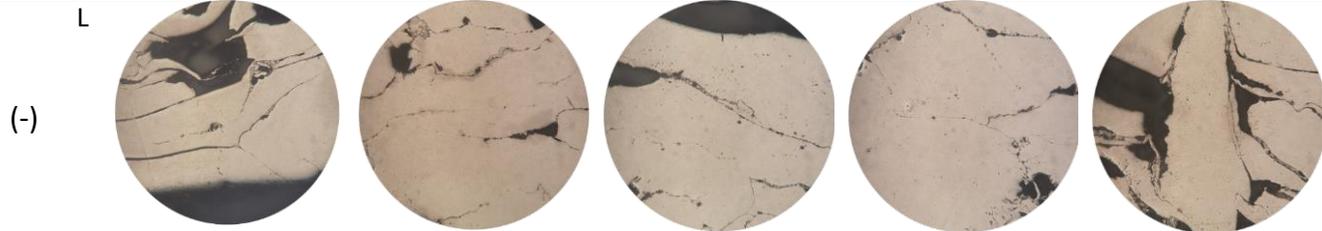
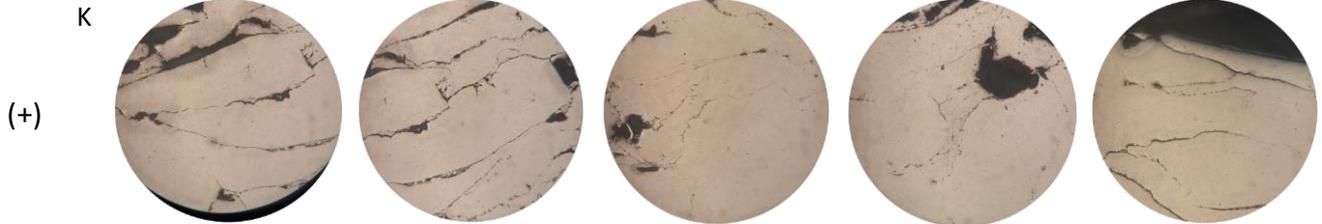


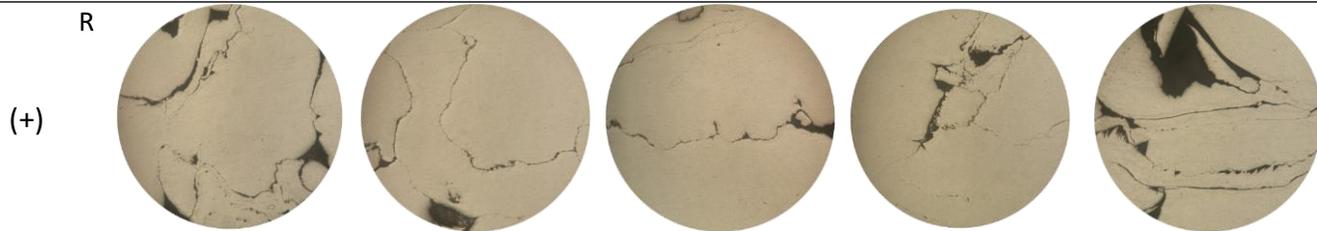
(+)

J



WC (-) (-) (-)





donde:

X_1 = tiempo de mezclado (15, 30 y 45 min)

X_2 = temperatura de sinterizado (530, 550 y 580°C)

X_3 = tiempo de sinterizado (1 h, 90 minutos y 2 h)

Analizando los tiempos de mezclado para el aluminio reforzado con SiC_P , podemos apreciar que, a niveles bajos de dicha variable, existen diferencias entre los distintos niveles de temperatura que se estudiaron. A niveles bajos de temperatura de sinterización las muestras presentan una distorsión o poco acomodo de las partículas que la conforman, atribuido a la falta de homogeneidad en el mezclado aunado a la necesidad de mayor energía para cruzar la barrera superficial.

En cuanto al nivel alto de temperatura de sinterización y el punto medio, se denota una mejor uniformidad del material, además de que el material de refuerzo, en este caso carburo de silicio se encuentra mejor distribuido en todo el volumen de las muestras. Sin embargo, su presencia se limita a la frente entre los límites de grano de cada muestra.

Por último, tenemos el nivel alto en cuanto a tiempos de mezclado, donde se muestra en cada una de las probetas realizadas una acumulación de partículas en zonas específicas debido a que aún no se logró romper la barrera entre estas, resaltando que el tiempo de mezclado después de cierto punto tiende a segregar el refuerzo por zonas y que dicho material no se encuentre de manera uniforme. A la vez, esto repercute en que al momento de realizar la compactación el material queda en los límites de grano, provocando que actúe como un acumulador de esfuerzos, dando paso a grietas interarticulares a lo largo de los compósitos fabricados.

Por otra parte, analizando el efecto de la variable X_1 (tiempo de mezclado) sobre la continuidad de la matriz 6061 y el refuerzo (SiC) se puede observar que el compósito alcanza una mayor continuidad de la matriz a lo largo de la muestra, así como una mejor distribución del refuerzo, lo cual permite que el refuerzo se aprecie con una mejor distribución cuando X_2 (temperatura de sinterizado) se emplea en un nivel alto.

Bajo estas mismas dos condiciones de trabajo, no se aprecia un efecto significativo de la variable X_3 (tiempo de sinterizado) sobre la continuidad de la matriz y/o una

mejor distribución del refuerzo por lo que se puede intuir que el incremento en el tiempo de sinterizado no es significativo, como puede apreciarse al comparar las micrografías correspondientes a las secciones C y D de los cuadrantes 1 a 5.

En cuanto al nivel alto de la variable X_1 (tiempo de mezclado) orientado a la continuidad de este compósito, se visualiza que la uniformidad de la matriz a lo largo de las muestras es deficiente en comparación a los niveles bajos de la variable X_1 , presentando agrietamiento a lo largo de las micrografías. Por su parte la distribución del refuerzo es mejor cuando X_2 (temperatura de sinterizado) se emplea en un nivel alto.

En este último caso, con las condiciones ya mencionadas, sí se presenta un efecto de la variable X_3 (tiempo de sinterizado) sobre la uniformidad de la pieza y una mayor distribución del refuerzo, por lo tanto, se cree que el tiempo de sinterizado sí es significativo en los niveles mencionados, como se aprecia en las micrografías presentadas en las secciones H e I de los cuadrantes 1 a 5.

Finalmente, una vez analizados los niveles alto y bajo, se puede apreciar que el punto central de las tres variables estudiadas arroja la mejor respuesta en términos de continuidad de la matriz y, por ende, distribución del refuerzo. Esto puede observarse la sección E de los a cuadrantes 1 a 5. Al evaluar los compósitos correspondientes a este nivel (E1, E2, E4 y E5) se percibe en las micrografías recopiladas que la matriz alcanza la máxima continuidad para el sistema 6061 reforzado con SiC, aunado a que el refuerzo particulado figura un nivel adecuado de distribución. Sin embargo, al igual que en todos los casos anteriores, el cuadrante central (columna 3) denota una baja continuidad de la matriz aun cuando los extremos de la muestra alcanzan una mayor unión de las partículas que conforman la pieza.

En cuanto a los tiempos de mezclado para el aluminio reforzado con SiC_p, podemos apreciar que, a niveles bajos de dicha variable, existen diferencias entre los distintos niveles de temperatura que se estudiaron. A niveles bajos de temperatura de sinterización las muestras presentan una pobre unión de las partículas que la conforman.

Respecto el nivel alto de temperatura de sinterización y el punto medio, se denota una mejor uniformidad del material, además de que el material de refuerzo, en este caso carburo de silicio está presente en los límites de grano de cada muestra.

Por último, tenemos el nivel alto en cuanto a tiempos de mezclado, donde se muestra en cada una de las probetas realizadas una acumulación del refuerzo en zonas específicas, resaltando que el tiempo de mezclado después de cierto punto tiende a acumular el refuerzo por zonas y que dicho material no se encuentre de manera uniforme. A la vez, esto repercute en que al momento de realizar la compactación el material queda en los límites entre partículas, provocando que

actúe como un acumulador de esfuerzos, dando paso a grietas interparticulares a lo largo de las piezas realizadas.

Analizando el efecto de la variable X_1 (tiempo de mezclado) sobre la continuidad de la matriz 6061 y el refuerzo (SiC) se puede observar que el compósito alcanza una mayor continuidad de la matriz a lo largo de la muestra, así como una mejor distribución del refuerzo, lo cual permite que el refuerzo se aprecie con una mejor distribución cuando X_2 (temperatura de sinterizado) se emplea en un nivel alto.

Bajo estas mismas dos condiciones de trabajo, no se aprecia un efecto significativo de la variable X_3 (tiempo de sinterizado) sobre la continuidad de la matriz y/o una mejor distribución del refuerzo por lo que se puede intuir que el incremento en el tiempo de sinterizado no es significativo, como puede apreciarse al comparar las micrografías correspondientes a las secciones C y D de los cuadrantes 1 a 5.

En cuanto al nivel alto de la variable X_1 (tiempo de mezclado) orientado a la continuidad de este compósito, se visualiza que la uniformidad de la matriz a lo largo de las muestras es deficiente en comparación a los niveles bajos de la variable X_1 , se puede observar agrietamiento a lo largo de las micrografías, por su parte la distribución del refuerzo es mejor cuando X_2 (temperatura de sinterizado) se emplea en un nivel alto.

En este último caso, con las condiciones ya mencionadas, sí se presenta un efecto de la variable X_3 (tiempo de sinterizado) sobre la uniformidad de la pieza y una mayor distribución del refuerzo, por lo tanto, se cree que el tiempo de sinterizado sí es significativo en los niveles mencionados, como se aprecia en las micrografías presentadas en las secciones H e I de los cuadrantes 1 a 5.

Finalmente, una vez analizados los niveles alto y bajo, se puede apreciar que el punto central de las tres variables estudiadas arroja la mejor respuesta en términos de continuidad de la matriz y, por ende, distribución del refuerzo. Esto puede observarse la sección E de los a cuadrantes 1 a 5. Al evaluar los compósitos correspondientes a este nivel (E1, E2, E4 y E5) se percibe en las micrografías recopiladas que la matriz alcanza la máxima continuidad para el sistema 6061 reforzado con SiC, aunado a que el refuerzo particulado figura un nivel adecuado de distribución. Sin embargo, al igual que en todos los casos anteriores, el cuadrante central (columna 3) denota una baja continuidad de la matriz aun cuando los extremos de la muestra alcanzan una mayor unión de las partículas que conforman la pieza.

En cuanto a los compósitos fabricados y reforzadas con WC_P , en el nivel bajo de tiempo de mezclado, se observa una tendencia de incremento de uniformidad en las piezas, conforme aumentan a los niveles de temperatura de sinterización y los tiempos de permanencia. Esto se explica debido a que a una mayor temperatura se asegura el proceso de sinterización de manera ideal, provocando la unión de las partículas que conforman la pieza en verde. Otra punto a resaltar y al igual que en

las piezas anteriores es que el al igual que en el sistema anterior, al no alcanzarse la unión entre partículas de la matriz, la barrera entre estas se mantuvo por lo que el refuerzo quedó segregado en esta región

Por parte del punto medio, se observa una pieza discontinua en comparación a los otros dos niveles de tiempo de mezclado (alto y bajo).

Respecto al nivel más alto de tiempo de mezclado para las piezas reforzadas con carburo de tungsteno se observa una mayor consolidación de la pieza (a excepción de la pieza P) respecto a los otros dos niveles de tiempo de mezclado, pero en específico, las piezas correspondientes a las temperaturas de sinterización de nivel alto muestran una mejor sinterización de las piezas en verde en comparación a los demás niveles de temperatura de sinterización. Esto debido a lo que se mencionó con anterioridad, una mayor temperatura puede propiciar una unión de las partículas de manera homogénea y uniforme a lo largo de las piezas.

Con respecto a la variable X_1 (tiempo de mezclado) se alcanza una continuidad y distribución del compuesto adecuada, siendo mejores cuando X_2 (temperatura de sinterizado) se implementa en el nivel alto.

Para la variable X_3 (tiempo de sinterizado) en conjunto a las dos variables ya mencionadas, no se aprecia un efecto significativo en cuanto a la continuidad de la matriz y la distribución del refuerzo, por ende, podemos mencionar que el aumento o la disminución del tiempo de sinterizado no afectará en gran medida la fabricación de los compósitos, como puede observarse en las micrografías mostradas en las secciones L y M de los cuadrantes 1 a 5.

En cuanto a la variable X_1 (tiempo de mezclado) a un nivel alto, podemos apreciar una continuidad pobre a niveles bajos de la variable X_2 (temperatura de sinterizado), caso contrario a lo que se muestra en niveles altos de esta misma variable, donde la matriz alcanza una mayor continuidad, denotando el hecho de ser una variable relevante en la producción de compósitos e incluso presentar los materiales compuestos con mayor continuidad. Por su parte, la distribución presentada no representa gran diferencia en alguno de los niveles de ambas variables mencionadas, esto aprecia en las micrografías presentadas en las secciones O, P, Q y R de los cuadrantes 1 a 5.

Analizando los mismos niveles de las variables mencionadas, podemos identificar que el efecto de la variable X_3 (tiempo de sinterizado) no muestra una respuesta relevante a lo largo de las muestras estudiadas, ya que a excepción de las micrografías de la sección P, el resto de las micrografías (secciones O, Q y R) presentan patrones similares en cuanto a continuidad de la matriz y distribución del refuerzo.

Para finalizar, al haber analizado los niveles alto y bajo, se identifica que el punto central presenta una menor continuidad respecto a las muestras realizadas a un

nivel alto de X_2 (temperatura de sinterizado), además, debido a dicha discontinuidad, el refuerzo se localiza en los huecos de la muestra, como se muestra en la sección N de los cuadrantes 1 a 5, donde en cada una de las micrografías se observa una falta de unión entre la matriz y el refuerzo.

Estos mismos compósitos (reforzadas con WC_P), en el nivel bajo de tiempo de mezclado, se puede observar una tendencia de incremento de uniformidad en las piezas, esto respecto aumentan a los niveles de temperatura de sinterización y los tiempos de permanencia. Esto se explica debido a que a una mayor temperatura se asegura el proceso de sinterización de manera ideal, provocando la unión de las partículas que conforman la pieza en verde. Otra cosa para resaltar y al igual que en las piezas anteriores es que el refuerzo utilizado se mantuvo en las orillas de grano.

Por parte del punto medio, se observa una pieza discontinua en comparación a los otros dos niveles de tiempo de mezclado (alto y bajo).

Respecto al nivel más alto de tiempo de mezclado para las piezas reforzadas con carburo de tungsteno se observa una mayor consolidación de la pieza (a excepción de la pieza P) respecto a los otros dos niveles de tiempo de mezclado, pero en específico las piezas correspondientes a las temperaturas de sinterización de nivel alto muestran una mejor sinterización de las piezas en verde en comparación a los demás niveles de temperatura de sinterización. Esto debido a lo que se mencionó con anterioridad, una mayor temperatura puede propiciar una unión de las partículas de manera homogénea y uniforme a lo largo de las piezas.

Una vez que se analiza la variable X_1 (tiempo de mezclado) se observa se obtuvo una continuidad y distribución del compósito adecuada, siendo mejores cuando X_2 (temperatura de sinterizado) se implementa en el nivel alto.

Para la variable X_3 (tiempo de sinterizado) en conjunto a las dos variables ya mencionadas, no se aprecia un efecto significativo en cuanto a la continuidad de la matriz y la distribución del refuerzo, por ende, podemos mencionar que el aumento o la disminución del tiempo de sinterizado no afectará en gran medida al fabricar los compósitos, esto se puede apreciar en las micrografías mostradas en las secciones L y M de los cuadrantes 1 a 5.

Analizando la variable X_1 (tiempo de mezclado) a un nivel alto, podemos apreciar una continuidad pobre a niveles bajos de la variable X_2 (temperatura de sinterizado), caso contrario a lo que se muestra en niveles altos de esta misma variable, donde la matriz tiene una mayor continuidad, denotando el hecho de ser una variable relevante en la producción de compósitos e incluso presentar los materiales compuestos con mayor continuidad. Por su parte, la distribución presentada no representa gran diferencia en alguno de los niveles de ambas variables mencionadas, esto aprecia en las micrografías presentadas en las secciones O, P, Q y R de los cuadrantes 1 a 5.

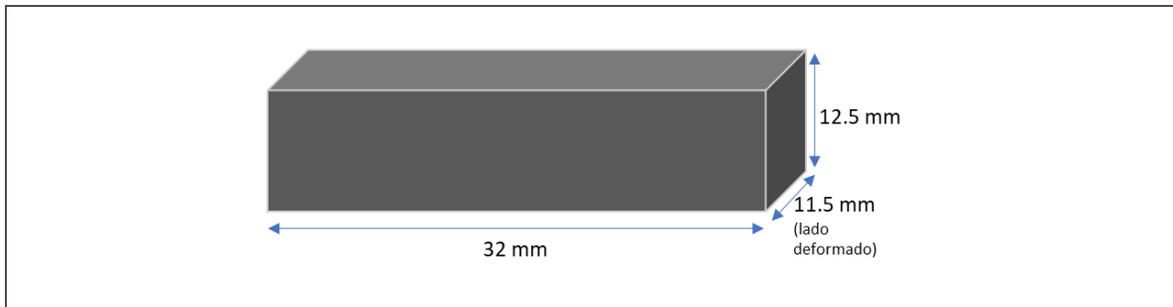
Analizando los mismos niveles de las variables mencionadas, podemos identificar que el efecto de la variable X_3 (tiempo de sinterizado) no muestra una respuesta relevante a lo largo de las muestras estudiadas, ya que a excepción de las micrografías de la sección P, el resto de las micrografías (secciones O, Q y R) presentan patrones similares en cuanto a continuidad de la matriz y distribución del refuerzo.

Para finalizar, al haber analizado los niveles alto y bajo, se identifica que el punto central presenta una menor continuidad respecto a las muestras realizadas a un nivel alto de X_2 (temperatura de sinterizado), además, debido a dicha discontinuidad, el refuerzo se presenta en los huecos de la muestra, esto se puede apreciar en la sección N de los cuadrantes 1 a 5, donde en cada una de las micrografías presenta una falta de unión entre el material que las conforma.

Analizando la tabla 13, en el caso de los materiales reforzados con SiC, se aprecia que cuando X_1 está en un nivel bajo, los materiales alcanzan una mayor deformación antes de que estos se fracturen. Al mismo tiempo, X_1 se puede identificar como la variable significativa, esto debido a que observando las otras dos variables (X_2 y X_3) a niveles bajos de X_1 no tienen relevancia, ya que prácticamente los valores obtenidos de deformación alcanzada son iguales en la mayoría de los casos.

Tabla 13. Porcentaje de deformación obtenido por cada uno de los materiales compuestos 6061/SiC_P y 6061/WC_P.

Material de refuerzo	Condiciones experimentales			mm deformados	Porcentaje de deformación en frío		
	X_1	X_2	X_3				
SiC	(-)	(-)	(-)	0.6	5.22%		
			(+)	0.5	4.35%		
		(+) P.C.	(-)	0.6	5.22%		
			(+) P.C.	0.6	5.22%		
	(+) P.C.	(-)	(-)	0.5	4.35%		
			(+)	0.3	2.61%		
		(+) P.C.	(-)	0.1	0.87%		
			(+)	0.9	7.83%		
			WC	(-) P.C.	(-)	0.2	1.74%
					(+)	1.5	13.04%
(-)	0.2	1.74%					
(+) P.C.	0.9	7.83%					
(+) P.C.	(-)	(-)		0.2	1.74%		
		(+)		0.2	1.74%		
	(+) P.C.	(-)		0.5	4.35%		
		(+) P.C.		0.5	4.35%		



*Velocidad de deformación implementada: 0.65 mm/min

Respecto al punto central, el valor obtenido de deformación fue igual a la mayoría de los valores cuando X_1 se maneja a nivel bajo, es decir, no hay un cambio significativo.

En cambio, cuando X_1 se trabaja a nivel alto, los valores de deformación tienden a ser diferentes entre sí. Enfocándonos en X_2 , se puede apreciar que a nivel bajo de esta variable se pueden obtener mayores porcentajes de deformación en los compósitos producidos, pero no mayores a los valores obtenidos cuando X_1 se trabaja a nivel bajo.

En cuanto a los materiales compuestos reforzados con WC, a nivel bajo de X_1 existe una diferencia entre los valores de deformación alcanzados para los materiales. Una vez analizando X_3 nos podemos dar cuenta que a niveles altos de dicha variable se alcanza la mayor deformación, en comparación a cuando se maneja un nivel bajo de la misma variable, lo que lleva a creer que esta es la variable significativa, al menos a niveles bajos de X_1 .

Respecto al punto medio, se aprecia un incremento notable en cuanto a la deformación obtenida antes de que el material falle, comparada con las demás variables, siendo las condiciones óptimas si lo que se busca es un material dúctil.

Por último, cuando X_1 se trabaja en niveles altos, podemos apreciar datos más homogéneos entre sí, además de notar que cuando X_2 se trabaja a niveles altos se alcanzan mayores porcentajes de deformación en comparación a cuando se trabaja en niveles bajos, dando la pauta a creer esta como la variable significativa en cuanto a deformación se trata.

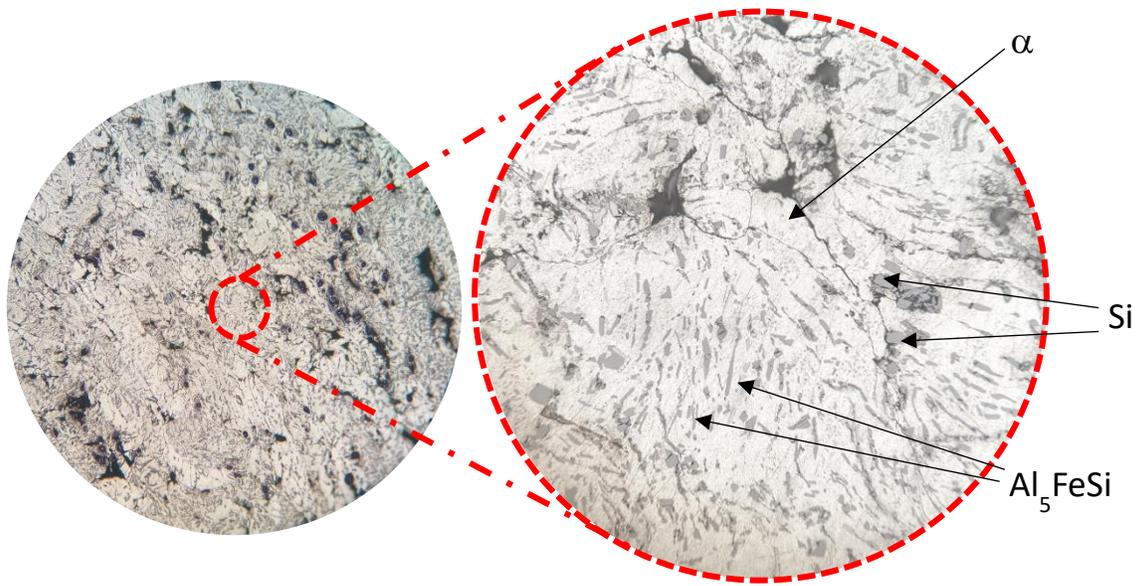


Figura 50. Identificación de microconstituyentes presentes en los compósitos fabricados empleando información recolectada en la literatura y los análisis químicos puntuales realizados. Muestra B (de acuerdo con la tabla 12). Micrografías obtenidas mediante MO.

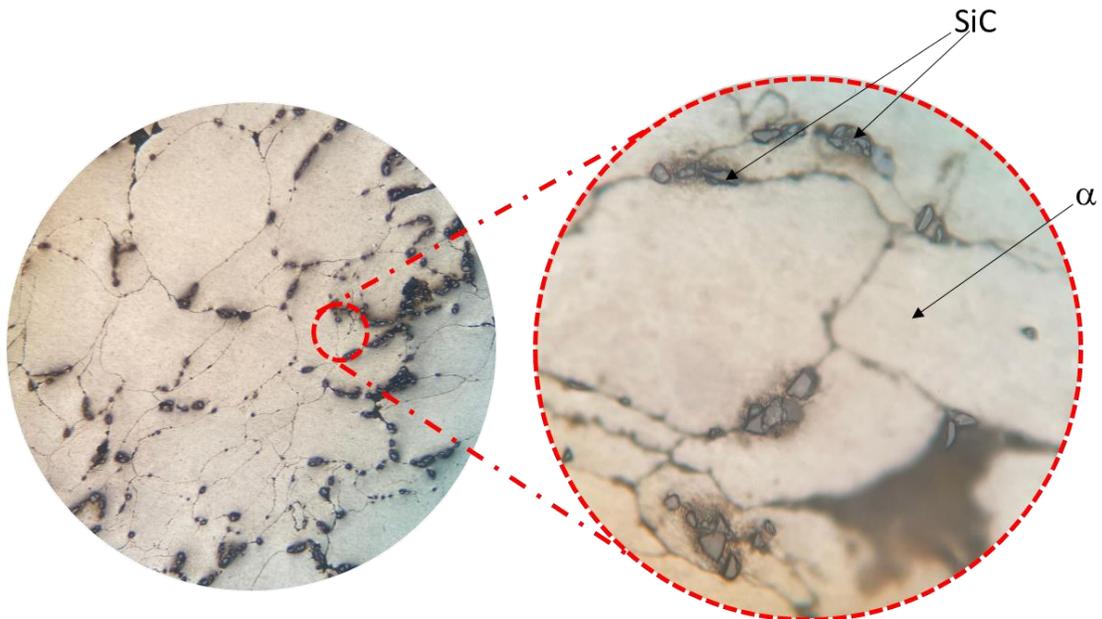


Figura 51. Identificación de microconstituyentes presentes en los compósitos fabricados empleando información recolectada en la literatura y los análisis químicos puntuales realizados. Muestra C (de acuerdo con la tabla 12). Micrografías obtenidas mediante MO.

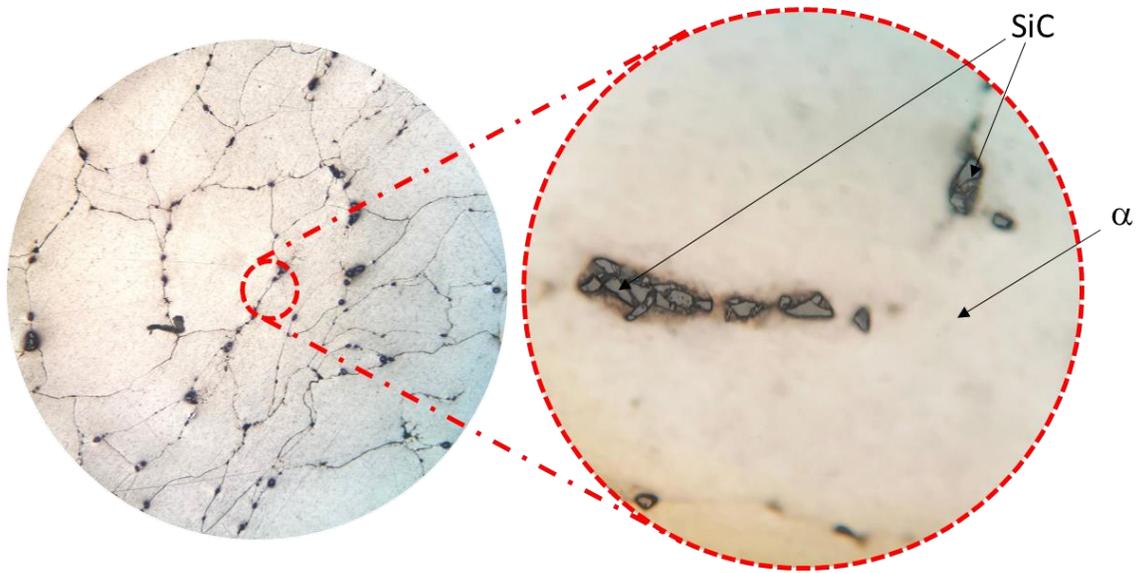


Figura 52. Identificación de microconstituyentes presentes en los compósitos fabricados empleando información recolectada en la literatura y los análisis químicos puntuales realizados. Muestra E (de acuerdo con la tabla 12). Micrografías obtenidas mediante MO.

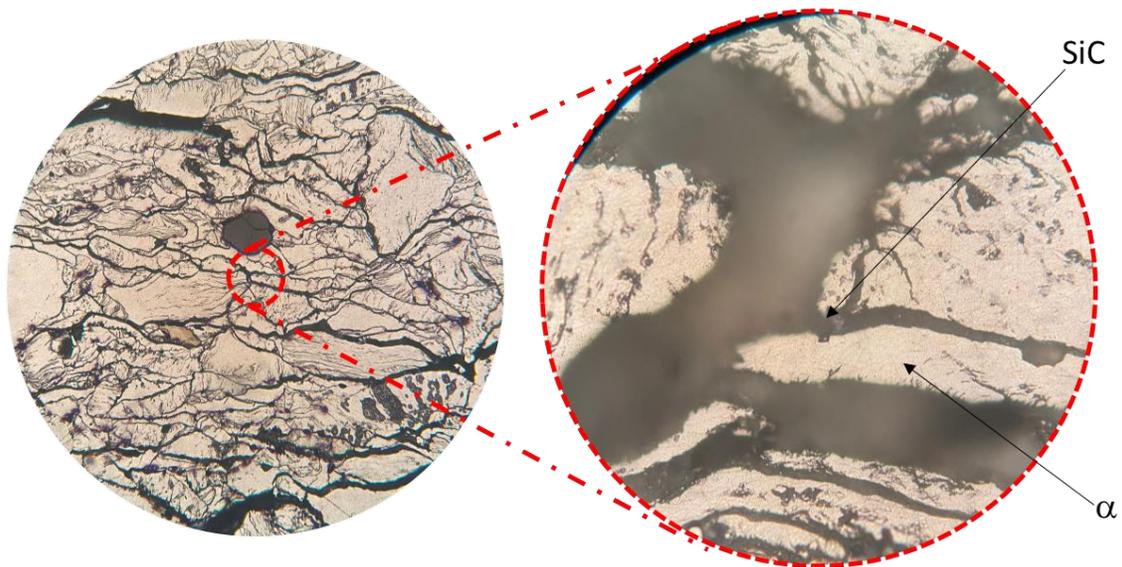


Figura 53. Identificación de microconstituyentes presentes en los compósitos fabricados empleando información recolectada en la literatura y los análisis químicos puntuales realizados. Muestra G (de acuerdo con la tabla 12). Micrografías obtenidas mediante MO.

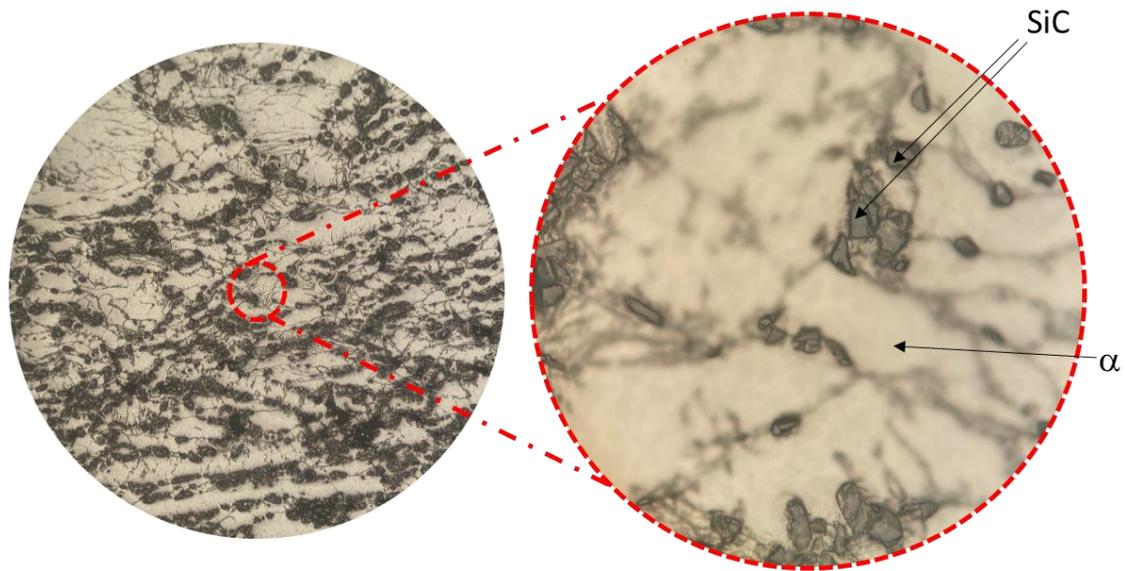


Figura 54. Identificación de microconstituyentes presentes en los compósitos fabricados empleando información recolectada en la literatura y los análisis químicos puntuales realizados. Muestra I (de acuerdo con la tabla 12). Micrografías obtenidas mediante MO.

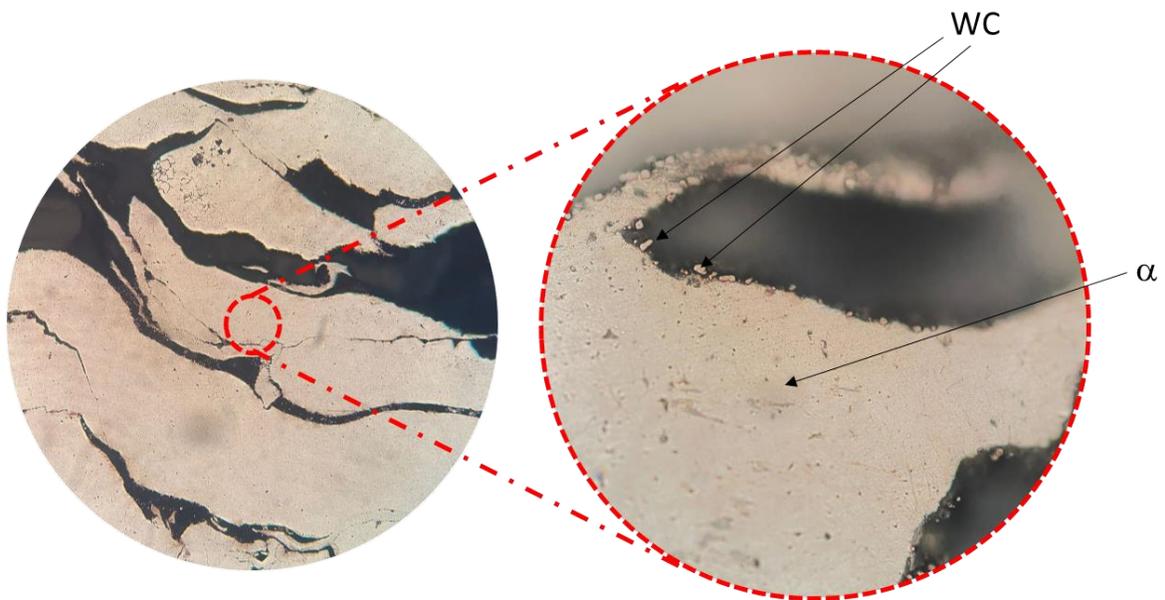


Figura 55. Identificación de microconstituyentes presentes en los compósitos fabricados empleando información recolectada en la literatura y los análisis químicos puntuales realizados. Muestra J (de acuerdo con la tabla 12). Micrografías obtenidas mediante MO.

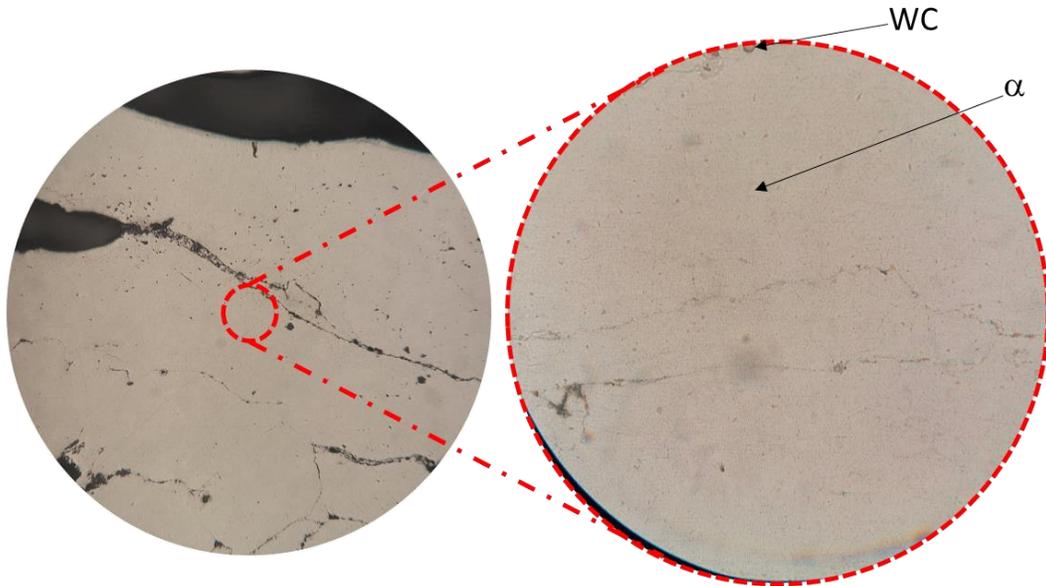


Figura 56. Identificación de microconstituyentes presentes en los compósitos fabricados empleando información recolectada en la literatura y los análisis químicos puntuales realizados. Muestra L (de acuerdo con la tabla 12). Micrografías obtenidas mediante MO.

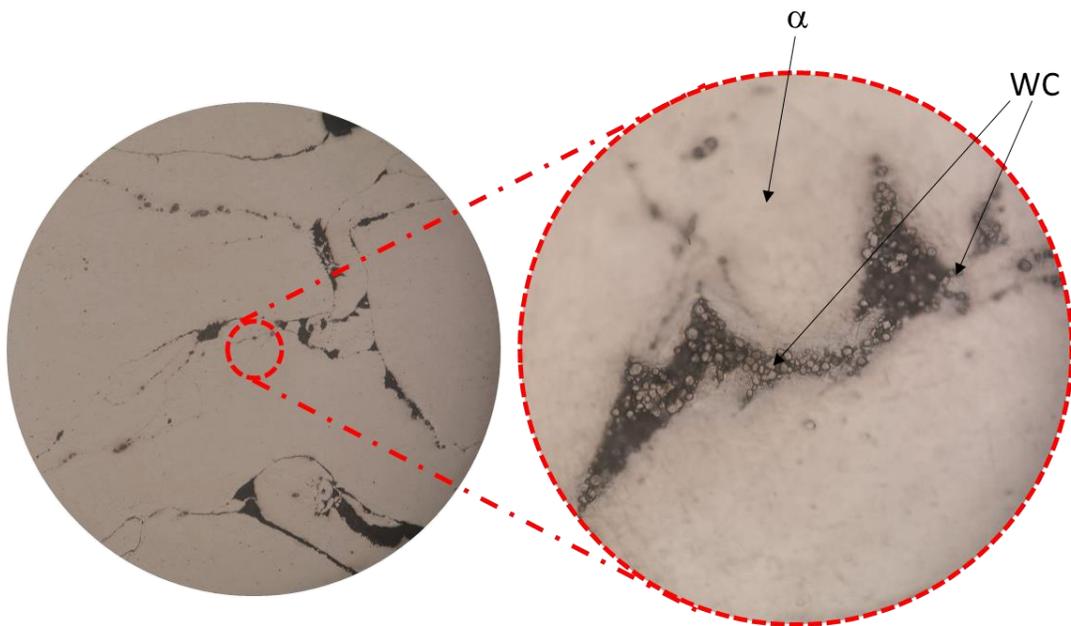


Figura 57. Identificación de microconstituyentes presentes en los compósitos fabricados empleando información recolectada en la literatura y los análisis químicos puntuales realizados. Muestra N (de acuerdo con la tabla 12). Micrografías obtenidas mediante MO.

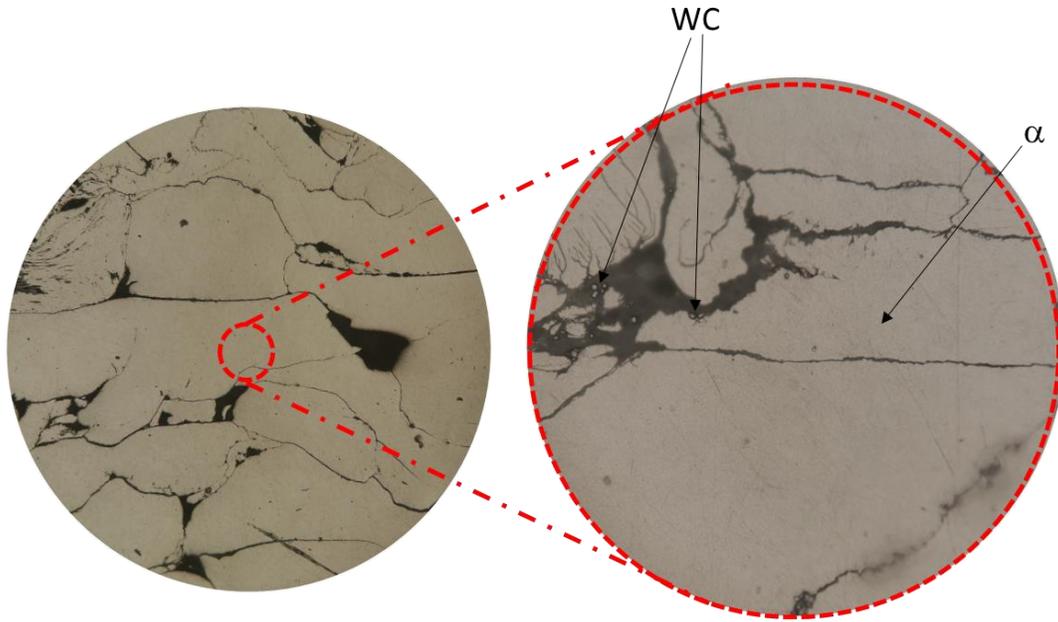


Figura 58. Identificación de microconstituyentes presentes en los compósitos fabricados empleando información recolectada en la literatura y los análisis químicos puntuales realizados. Muestra P (de acuerdo con la tabla 12). Micrografías obtenidas mediante MO.

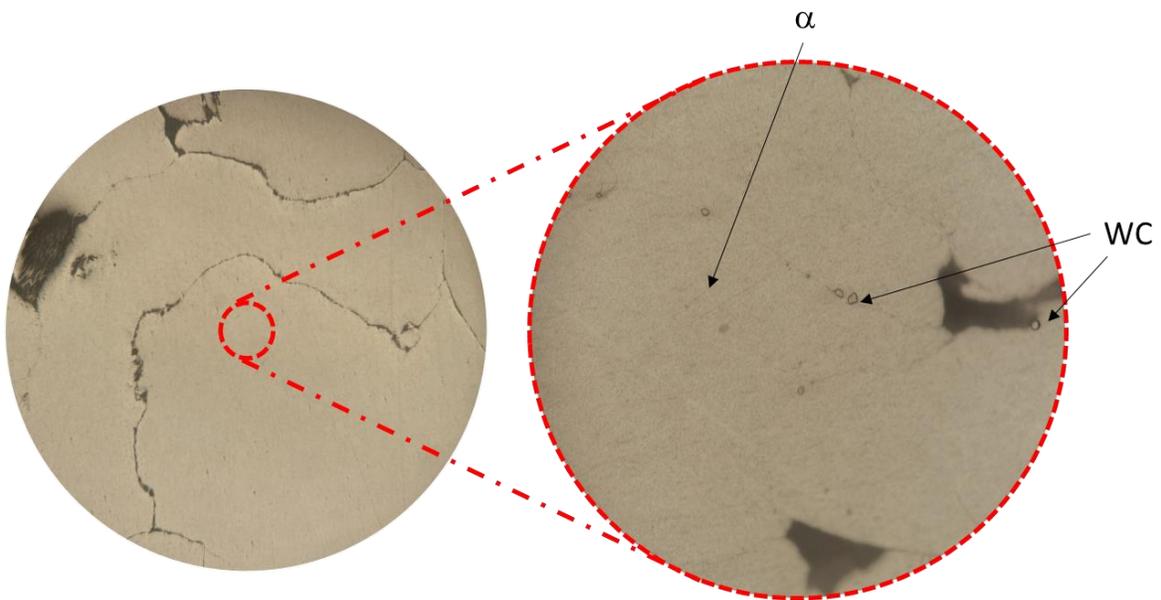


Figura 59. Identificación de microconstituyentes presentes en los compósitos fabricados empleando información recolectada en la literatura y los análisis químicos puntuales realizados. Muestra R (de acuerdo con la tabla 12). Micrografías obtenidas mediante MO.

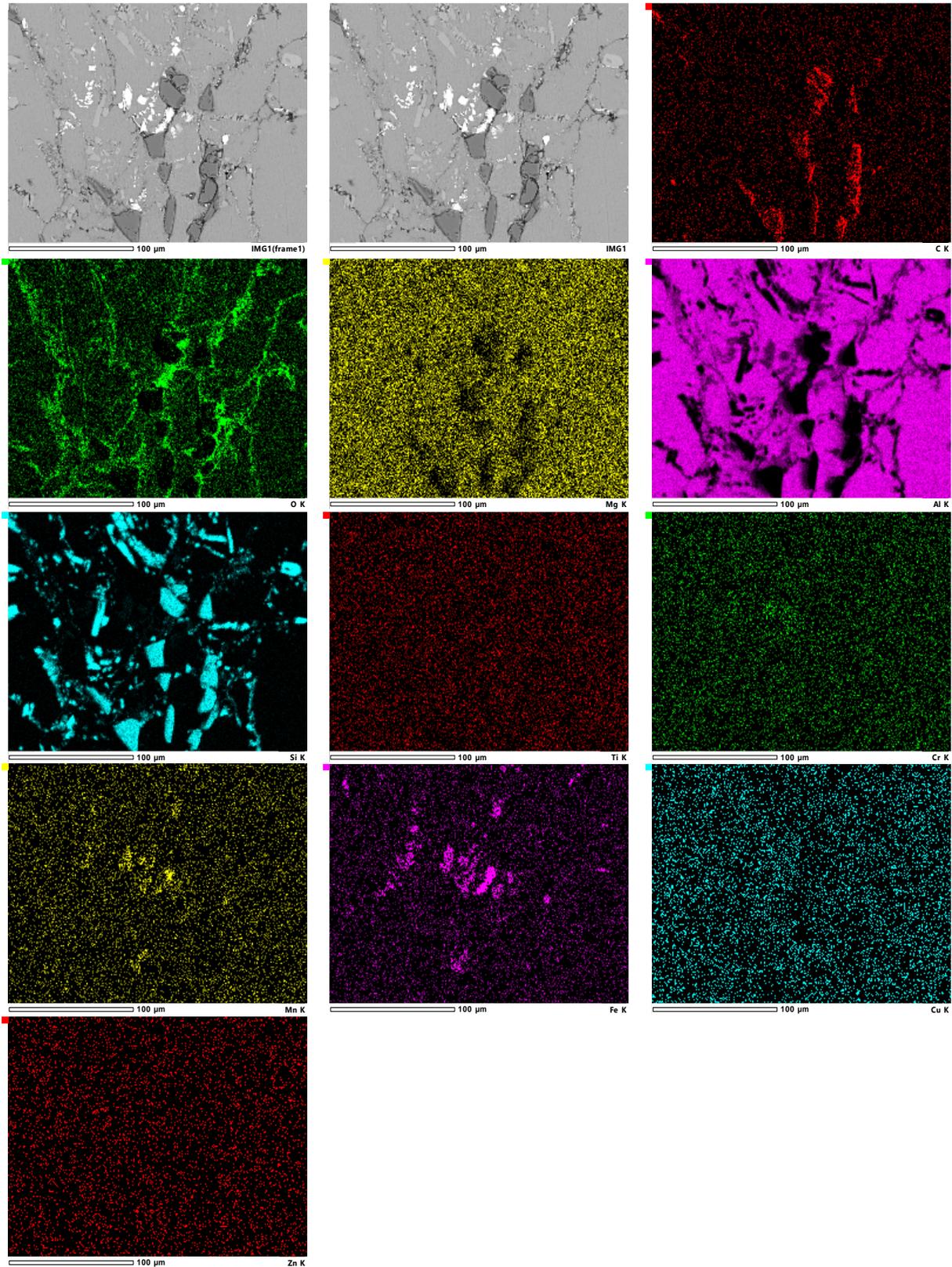


Figura 60. Mapeo elemental realizado mediante MEB a la muestra A (véase en la tabla 12).

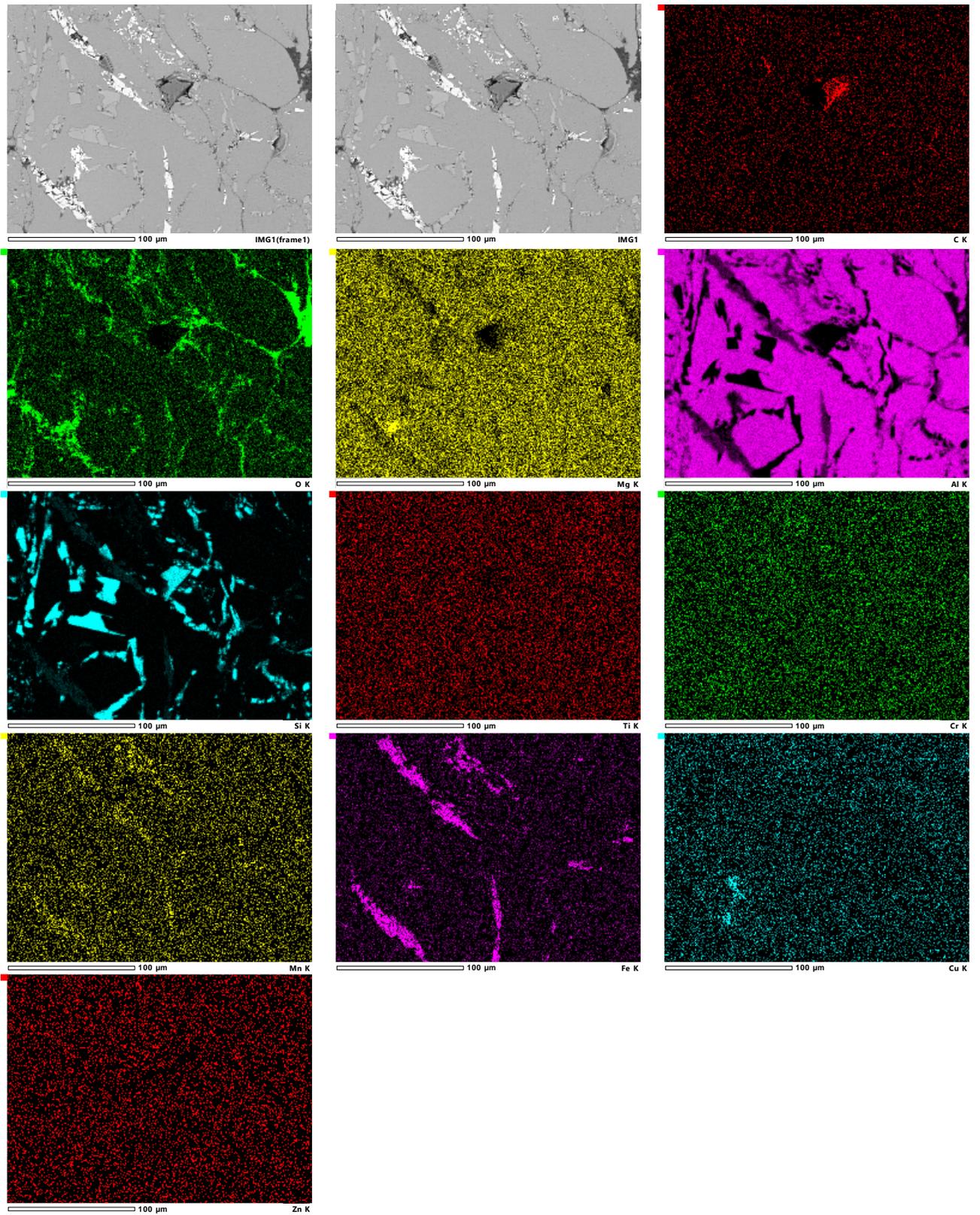


Figura 61. Mapeo elemental realizado mediante MEB a la muestra B (véase en la tabla 12).

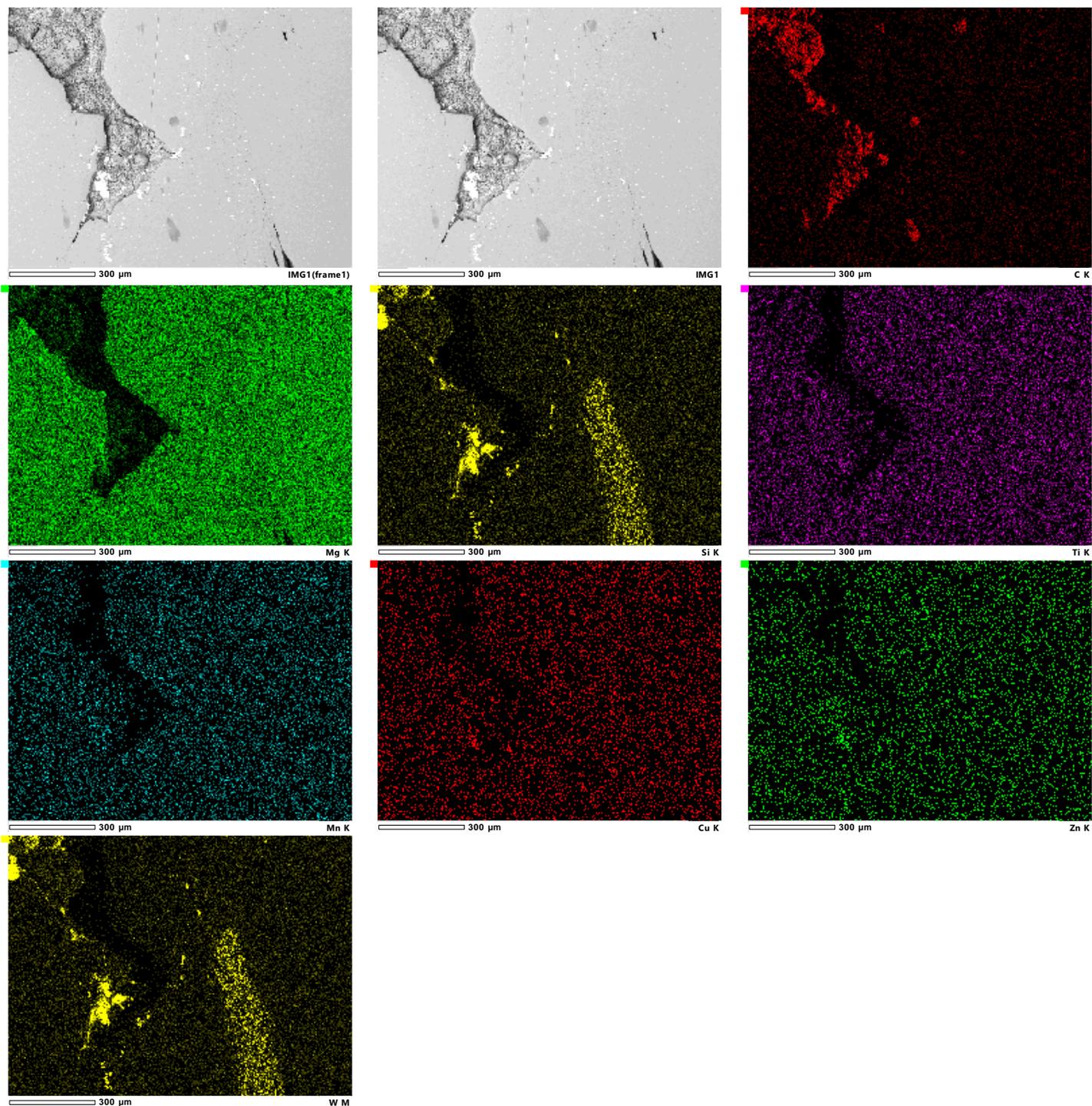


Figura 62. Mapeo elemental realizado mediante MEB a la muestra J (véase en la tabla 12).

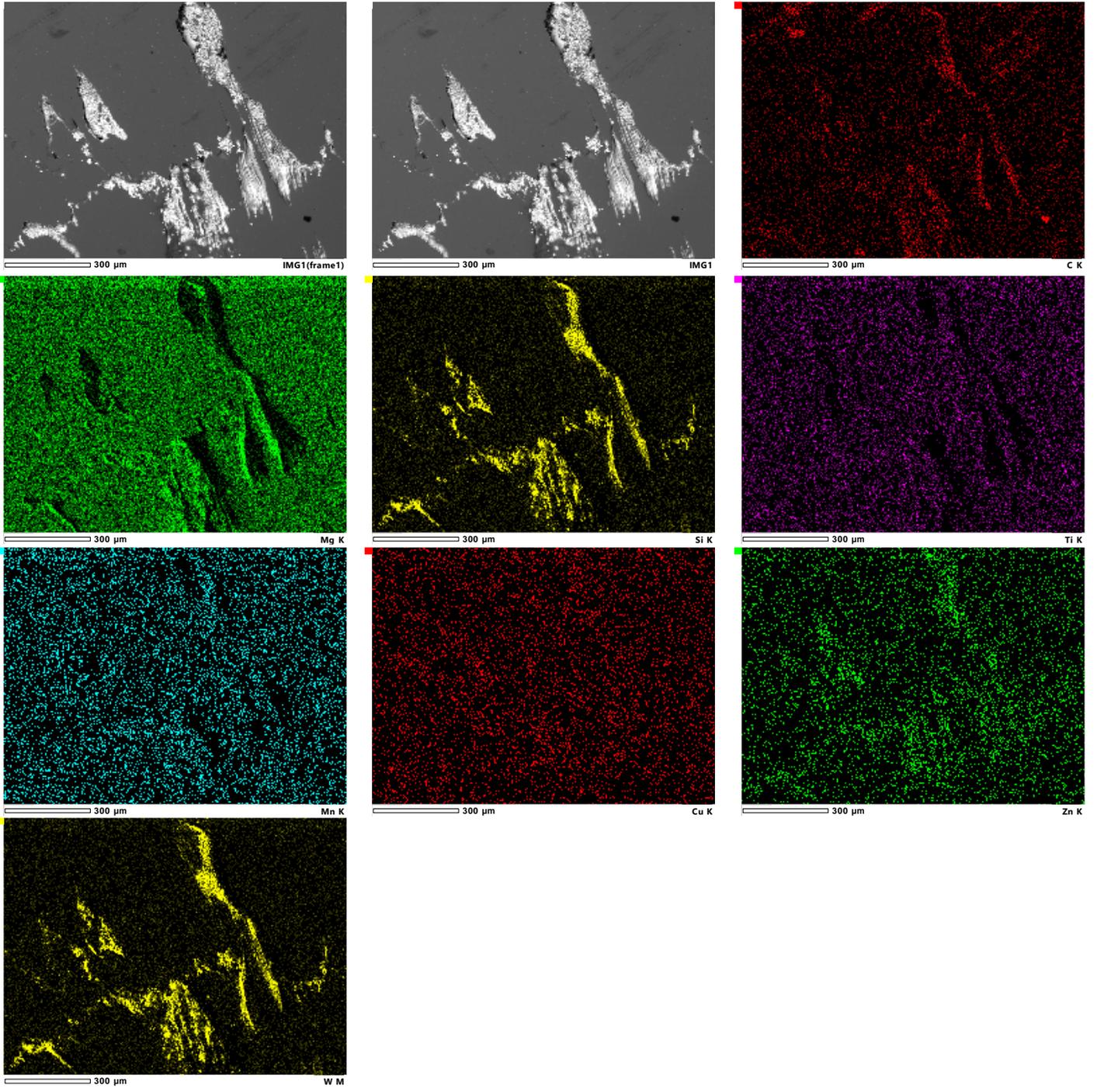


Figura 63. Mapeo elemental realizado mediante MEB a la muestra M (véase en la tabla 12).

Al analizar el mapeo elemental de la muestra A (figura 60) correspondiente a un compósito reforzado con SiC se puede identificar y corroborar la presencia de elementos hallados previamente (tabla 8) parte de la aleación 6061 [30] con excepción del Mg cuya presencia se encuentra en casi toda la matriz, sin incluir los espacios donde se encuentran las partículas de SiC. De igual forma, podemos identificar una acumulación de Mn y Fe en algunas zonas del compósito, estos elementos de acuerdo con “*ASM Handbook: Volume 15*” [33], afectan directamente en la ductilidad de los aluminios, siendo un posible causante de la poca tolerancia a la deformación presentada al laminar dicha pieza (véase en tabla 13).

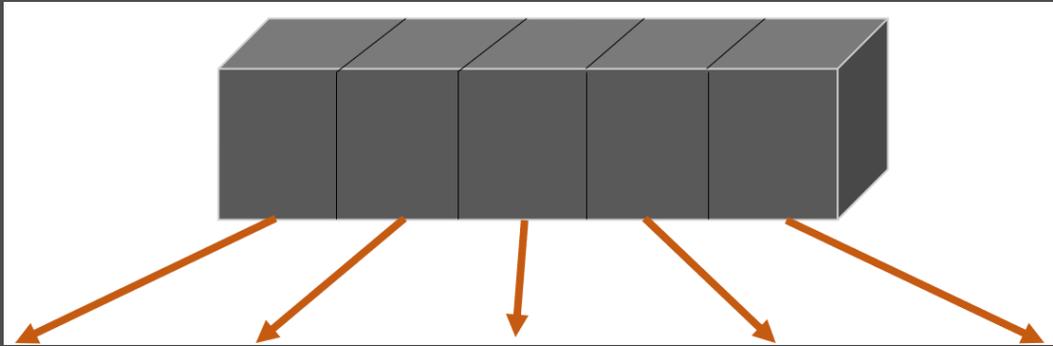
En el caso de la figura 61, esta denota nuevamente presencia de Mg sobre toda la matriz del compósito producido (muestra B, reforzada con SiC), al mismo tiempo se aprecia la presencia de oxígeno en zonas resaltadas, esto indica la posible presencia de óxidos complejos, constituidos por Fe-Mn-O, mismos que tienen un efecto de fragilización en los materiales compuestos producidos.

Respecto a la figura 62 y 63, correspondientes a un material compuesto reforzado con WC (muestra J y M, correspondientemente), se tiene la presencia de W y Si en las mismas zonas a lo largo del cuadrante estudiado mediante MEB, además de que al igual que en los compósitos reforzados con SiC se tiene la presencia de Mg en toda la matriz.

Con los datos recabados, se decidió que las condiciones de trabajo que habían presentado un material compuesto con mejor uniformidad en su matriz, distribución entre sus partículas y desempeño en cuanto a deformación respecto a todas las combinaciones de variables estudiadas fueron: 30 minutos de mezclado, sinterización a 550°C por 2 horas y media para el compósito reforzado con SiC. Y 45 de mezclado, sinterización a 550°C por 2 horas y media para el compósito reforzado con WC.

Para ambos casos se realizaron dos probetas con el fin de obtener un resultado replicado y para facilitar el estudio de estos materiales. Obteniendo así los siguientes resultados:

Tabla 14. Micrografías tomadas a 100X mediante MO, obtenidas por cada uno de los cinco cuadrantes para un compósitos 6061/SiC_P y 6061/WC_P.



Material de refuerzo	Condiciones experimentales			Cuadrantes				
	X ₁	X ₂	X ₃	1	2	3	4	5
SiC	P.C	P.C	(+) (A)					
				(B)				
WC	P.C	(+) (C)	(+) (D)					
				(D)				

Analizando los compósitos mostrados en la tabla 14, específicamente las micrografías correspondientes a las filas “A” y “B”, podemos denotar una buena

continuidad en cada uno de los cuadrantes, al punto de no poder identificar si existen límites entre las partículas que conforman dicho material compuesto, por lo que, el tiempo y temperatura de sinterización (2 horas y 550°C, respectivamente) se pueden definir como los adecuados para realizar materiales compuestos con 5% de refuerzo de SiC, esto de acuerdo a las variables estudiadas. De igual forma, en ambos casos podemos apreciar que en los 5 cuadrantes estudiados la dispersión de SiC a lo largo de los compósitos es uniforme, denotando que el tiempo de mezclado (30 minutos) es suficiente para obtener un buen mezclado entre las partículas de aluminio y de SiC.

En cuanto a las filas "C" y "D", estas corresponden a los materiales compuestos reforzados con WC, al igual que en las pruebas realizadas en un inicio, en estos compósitos el refuerzo queda ubicado en los límites de grano, además, en el caso del material compuesto "C", se nota una gran discontinuidad a medida que se avanza en los cuadrantes. Caso contrario en el material compuesto "D", donde este denota una mayor continuidad a pesar de haber sido realizadas ambas muestras a las mismas condiciones (30 minutos de mezclado, 2 horas y 580°C de sinterización).

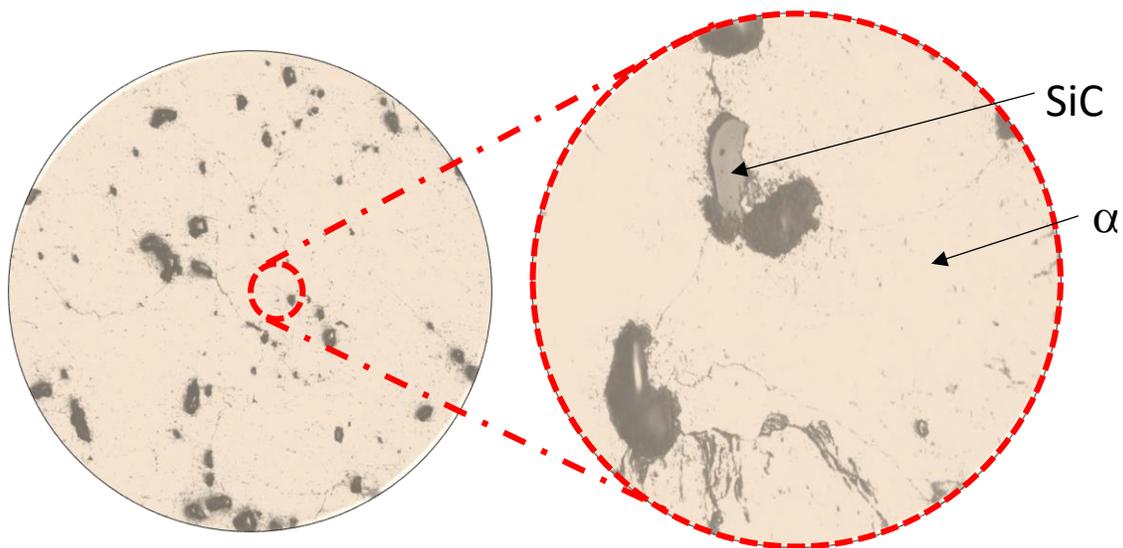


Figura 64. Identificación de microconstituyentes presentes en los compósitos fabricados empleando información recolectada en la literatura y los análisis químicos puntuales realizados. Muestra B (de acuerdo con la tabla 13). Micrografías obtenidas mediante MO.

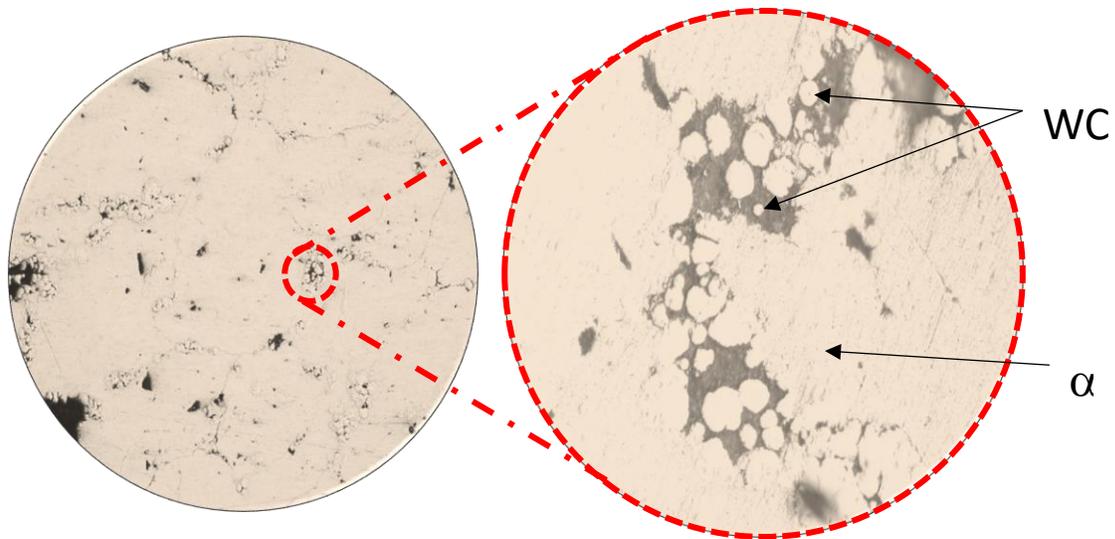
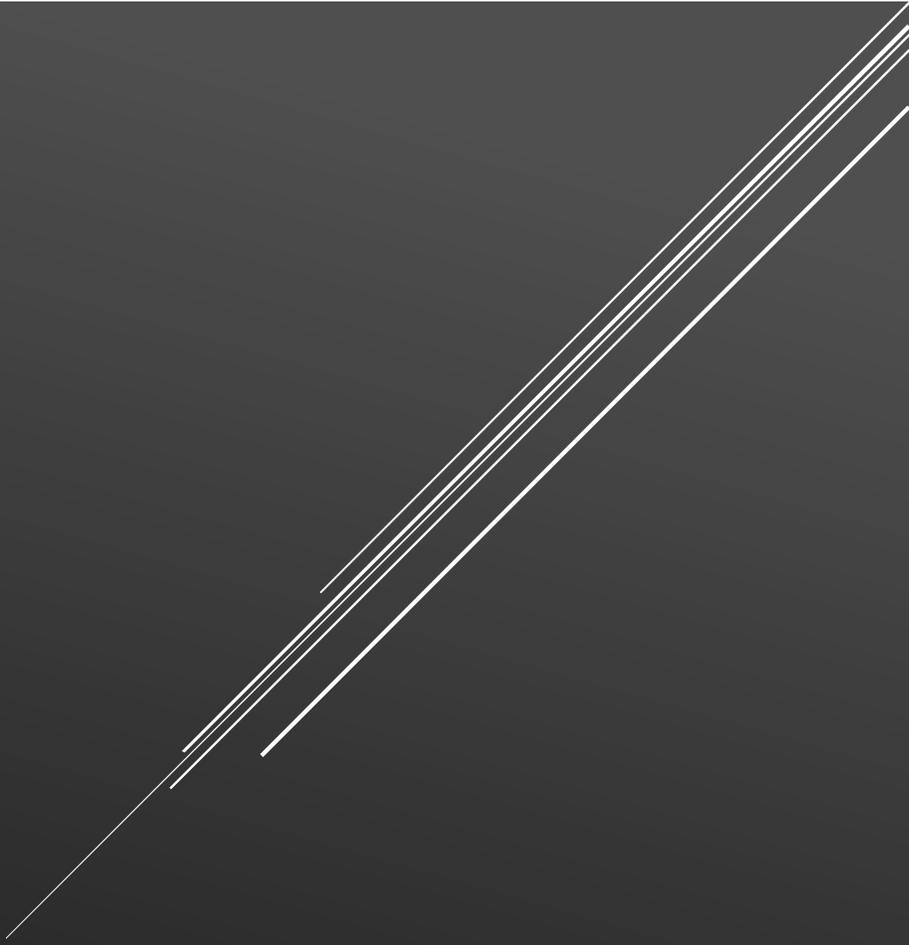


Figura 65. Identificación de microconstituyentes presentes en los compósitos fabricados empleando información recolectada en la literatura y los análisis químicos puntuales realizados. Muestra P (de acuerdo con la tabla 13). Micrografías obtenidas mediante MO.

Las figuras 64 y 65 muestran a mayor detalle lo ya mencionado acerca de los compósitos creados a partir de las variables que mostraron mejor resultado.

En el caso de la figura 64, podemos apreciar una matriz de α -Al, además de una óptima continuidad del material, donde los límites de grano entre las partículas que conforman el material compuesto no son particularmente notorios. Por su parte, podemos identificar la presencia del refuerzo, en este caso SiC, con un color gris Oxford, dichas partículas parecen estar a lo largo de la matriz, con una morfología irregular.

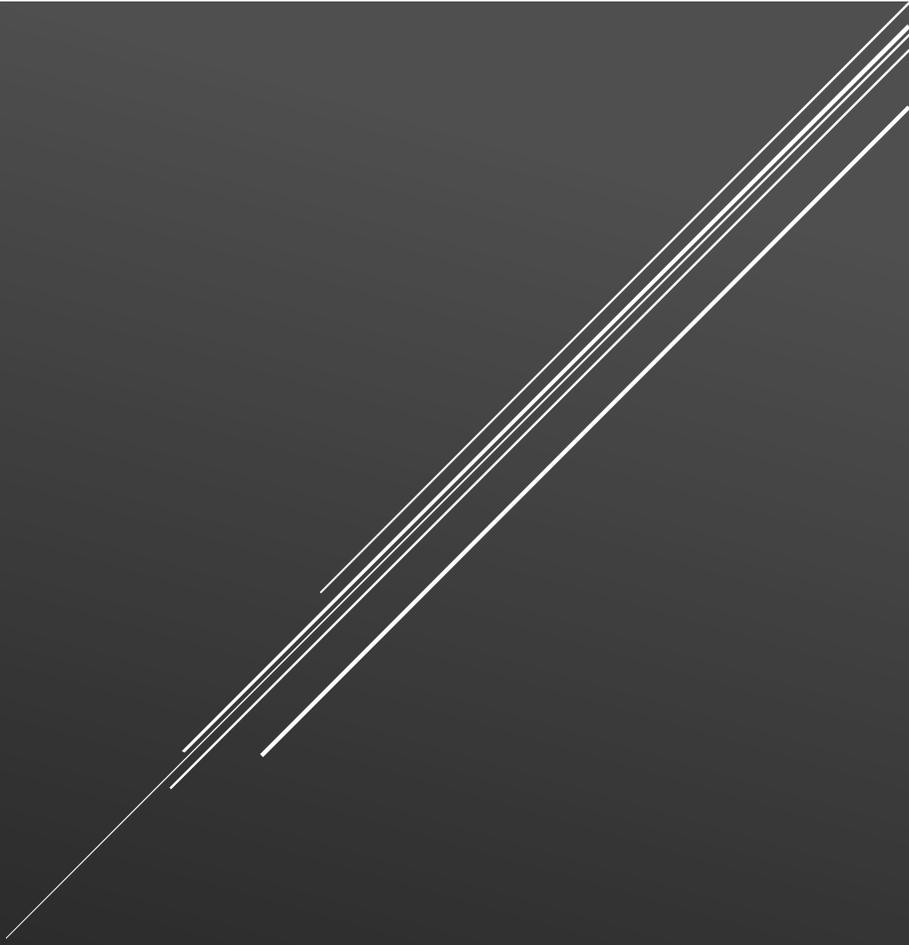
Respecto a la figura 65, de igual forma, se puede identificar una matriz de α -Al, en este caso, la continuidad del material no es la mejor, debido a que se presentan porosidades y delimitaciones a lo largo de la matriz. Debido a la presencia de estas discontinuidades, el refuerzo, en este caso WC, quedó atrapado en estos defectos, así como en los límites de grano presentes entre las partículas de aluminio.



CONCLUSIONES

Conclusiones

- La ruta de limpieza más efectiva se obtuvo con el procedimiento número seis que consiste en lauril sulfato de sodio líquido + bencina + alcohol isopropílico finalizando con la calcinación del residuo (en el caso de la rebaba).
- La variable que repercutió en la obtención compuestos con una distribución de refuerzos adecuada fue el tiempo de mezclado para el caso de residuos en forma de rebaba y el tiempo de aleado mecánico, en el caso de aquellos con virutas.
- Las condiciones iniciales de compactación formaron un compósito mal consolidado dando como resultado, desprendimiento de material. Se encontró que, un incremento en la carga aplicada en la compactación de las muestras incrementa la continuidad del compósito aun a una temperatura de sinterización menor.
- Se presume que la temperatura y el tiempo de sinterización incluso siendo adecuados y no elevan la unión por difusión si la pieza en verde presenta una consolidación deficiente.
- El aspecto, diámetro y redondez de las partículas de SiC es el adecuado ya que existe una buena distribución entre dichos atributos, caso contrario al WC que es más uniforme en cuanto a dichas características.
- Las variables que denotaron una mejor continuidad y distribución del refuerzo en el caso de los compósitos reforzados con SiC fueron: 30 minutos de mezclado, 2 horas y 550°C de sinterizado.
- Las variables que denotaron una mejor continuidad y distribución del refuerzo en el caso de los compósitos reforzados con SiC fueron: 30 minutos de mezclado, 2 horas y 550°C de sinterizado.
- Las variables que denotaron una mejor continuidad y distribución del refuerzo en el caso de los compósitos reforzados con WC fueron: 30 minutos de mezclado, 2 horas y 580°C de sinterizado.



BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

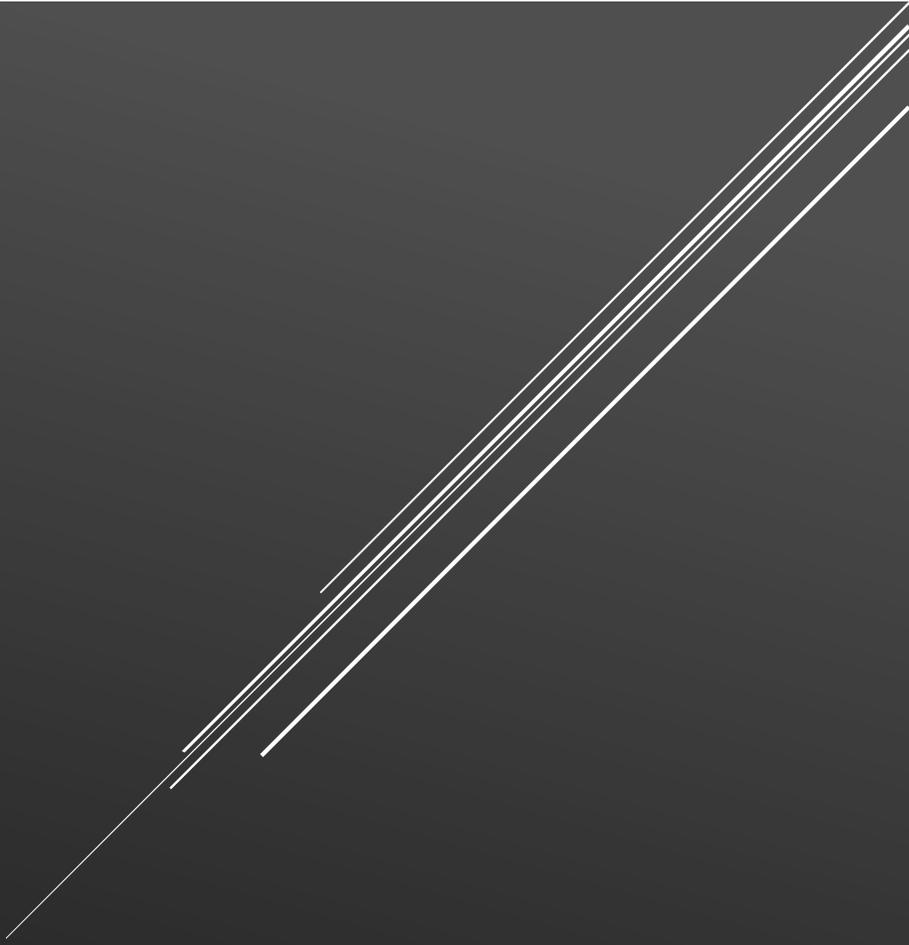
- [1] Bingbing Wan, Weiping Chen. Review of solid-state recycling of aluminum chips Mishra. *Resources, Conservation & Recycling Resources*, 125 (2017) 37–47.
- [2] Shazarel Shamsudina, MA Lajis. Evolutionary in Solid State Recycling Techniques of Aluminium: A review, *Procedia CIRP* 40 (2016) 256 – 261.
- [3] Azlan Ahmad, Mohd Amri Lajis. On the Role of Processing Parameters in Producing Recycled Aluminum AA6061 Based Metal Matrix Composite (MMC-AIR) Prepared Using Hot Press Forging (HPF) Process, *Materials* 10 (2017), 1098.
- [4] Güley V, Khalifa NB. Direct recycling of 1050 aluminum alloy scrap material mixed with 6060 aluminum alloy chips by hot extrusion. *International Journal of Material Forming* 3 (2010), 853-6.
- [5] P. Gupta, R. K. Srivastava, Fabrication of Ceramic Reinforcement Aluminium and Its Alloys Metal Matrix Composite Materials: A Review, *Materials Today: Proceedings* 5 (2018) 18761–18775.
- [6] Tekkaya AE, Schikorra M, Becker D. Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 3343-50.
- [7] Manual de minimización, tratamiento y disposición. Concepto de Manejo de Residuos Peligrosos e Industriales para el Giro Metalmeccánica. Comisión Ambiental Metropolitana en Colaboración con: Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ), TÜV ARGE-MEX.
- [8] Global Metal Matrix Composites product and end-use outlook (volume, tons; revenue, USD million, 2012-2022).
- [9] Kumar S., Mathieux F. A novel powder metallurgy-based method for the recycling of aluminum adapted to a small island developing state in the Pacific, *Int. J. Environ. Consc. Des. Manuf.* 2017, 13 (3–4), 1–22.
- [10] Anónimo. (2021). Residuo. Real Academia Española. Recuperado el 5 de febrero de 2022 de <https://dle.rae.es/residuo>
- [11] Semarnat. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, edición 2018. Semarnat. México. 2021. Pp. 318.

- [12] Anónimo. (2019, 20 de agosto). La contaminación del agua disminuye en un tercio el crecimiento de algunos países. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado el 5 de febrero de 2022 de <https://news.un.org/es/story/2019/08/1460891>
- [13] Anónimo. (2019, 23 de septiembre). La crisis climática - una carrera que podemos ganar. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado el 5 de febrero de 2022 de <https://www.un.org/es/un75/climate-crisis-race-we-can-win>
- [14] Anónimo. (2010, 13 de mayo). PNUMA: Reciclaje de metales esencial para el desarrollo. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado el 5 de febrero de 2022 de <https://news.un.org/es/story/2010/05/1191601>
- [15] ASM International. (2001). *ASM handbook: Volume 21. Materials Park, OH: ASM International*. Pp 39-41.
- [16] Letcher Trevor & Vallero Daniel. (2019). *Waste A Handbook for Management. United Kingdom: Elsevier*. Pp. 211-214.
- [17] Ramírez Eduardo. (2017). ITS Clasificación Comercial de Metálicos 2017. México: Gerdau Corsa. Pp. 8-22.
- [18] ASM International. (1998). *ASM handbook: Volume 7. Materials Park, OH: ASM International*. Pp. 10-56.
- [19] Kalpakjian, S. (2008). MANUFACTURA, INGENIERIA Y TECNOLOGIA (5a. ed.). MEXICO: PEARSON EDUCACION. Pp. 223, 483-509.
- [20] Askeland, D. R. (1984). *The science and engineering of materials. Monterey, CA: Brooks/Cole Engineering Division*. Pp. 53.
- [21] Balasubramaniam, Stalin & Arivukkarasan, S. & Prabhu, G.A. (2015). *Microstructure and mechanical properties evaluation of aluminium matrix reinforced with tungsten carbide and silicon carbide. International Journal of Applied Engineering Research*. 10. 3994-3999.
- [22] Meignanamoorthy, M. and Ravichandran, M. (2018). "Synthesis of Metal Matrix Composites via Powder Metallurgy Route: a Review" *Mechanics and Mechanical Engineering*, vol.22, no.1, pp.65-76.

- [23] Guttikonda, Manohar & Dey, Abhijit & Pandey, Krishna & Maity, Saikat. (2018). *Fabrication of metal matrix composites by powder metallurgy: A review. AIP Conference Proceedings*. 1952. 020041. 10.1063/1.5032003.
- [24] Simon, Andrea & Lipusz, Dora & Baumli, P. & Balint, P. & Kaptay, G. & Gergely, Greta & Sfikas, A. & Lekatou, Angeliki & Karantzalis, Alexander & Gácsi, Zoltán. (2015). *Microstructure And Mechanical Properties Of Al-WC Composites. Archives of Metallurgy and Materials*. 60. 1517-1521. 10.1515/amm-2015-0164.
- [25] Woźniak, Jarosław & Kostecki, Marek & Broniszewski, Kamil & Bochniak, Włodzimierz & Olszyna, Andrzej. (2014). *Influence of mixing parameters on homogeneity of Al/SiC composites. Archives of Metallurgy and Materials*. 59. 1493-1498. 10.2478/amm-2014-0254.
- [26] Ziejewska, Celina & Marczyk, Joanna & Szewczyk-Nykiel, Aneta & Nykiel, M. & Hebda, Marek. (2019). *Influence of size and volume share of WC particles on the properties of sintered metal matrix composites. Advanced Powder Technology*. 30. 10.1016/j.appt.2019.01.013.
- [27] Ahmad, Azlan & Lajis, Mohd & Yusuf, N.K. (2017). *On the Role of Processing Parameters in Producing Recycled Aluminum AA6061 Based Metal Matrix Composite (MMC-AIR) Prepared Using Hot Press Forging (HPF) Process. Materials (Basel, Switzerland)*. 10. 10.3390/ma10091098.
- [28] Rahim, S.N. & Lajis, Mohd Amri & Ariffin, S. (2015). *A Review on Recycling Aluminum Chips by Hot Extrusion Process. Procedia CIRP*. 26. 761-766. 10.1016/j.procir.2015.01.013.
- [29] Gao, Zeng, Congxin Yin, Dongfeng Cheng, Jianguang Feng, Peng He, Jitai Niu, and Josip Brnic. (2021). "Sintering Bonding of SiC Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites by Using Cu Nanoparticles and Liquid Ga in Air" *Nanomaterials* 11, no. 7: 1800.
- [30] ASTM International (s.f.). *ASTM B 308/308M-10 Standard Specification for Aluminum-Alloy 6061-T6 Standard Structural Profiles*. Recuperado el 14 de mayo de 2022 de

http://www.pacificcrn.com/Upload/file/201707/13/20170713191553_60638.pdf

- [31] Ignacio;Edna Vázquez Vélez, Diego Humberto Cuervo Amaya & Adrian Cristobal Neri (2014). "La química del jabón y algunas aplicaciones" Revista Digital Universitaria [en línea], Vol. 15, No.5 [Consultada:]. Recuperada el 29 de mayo de 2022 de <http://www.revista.unam.mx/vol.15/num5/art38/index.html>
- [32] UAM (s.f.). PRÁCTICA 5. SAPONIFICACIÓN: OBTENCIÓN DE JABÓN. Recuperado el 22 de mayo de 2022 de <http://www.qfa.uam.es/qb/practic/P5-guion.pdf>
- [33] ASM International. (2008). *ASM Handbook: Volume 15. Materials Park, OH: ASM International*. Pp 1633.
- [34] Anónimo (s.f.). Carburo de silicio. Proceso de fabricación. Recuperado el 29 de mayo de 2022 de [https://www.gab-neumann.com/Carburo-de-silicio-Proceso-de-fabricaci%C3%B3n#:~:text=El%20proceso%20de%20fabricaci%C3%B3n%20m%C3%A1s,C%20\(4530%20%C2%B0%20F\).](https://www.gab-neumann.com/Carburo-de-silicio-Proceso-de-fabricaci%C3%B3n#:~:text=El%20proceso%20de%20fabricaci%C3%B3n%20m%C3%A1s,C%20(4530%20%C2%B0%20F).)
- [35] Anónimo (s.f.). Carburación de tungsteno. Recuperado el 29 de mayo de 2022 de <http://www.tungsten-powder.com/spanish/Tungsten-Carburization.html>
- [36] ISO 3685:1993(E), International Standard, Tool testing with single point turning tools.



ANEXOS

Anexos.

Anexo A. Ejemplo de cálculos para la fabricación de probetas de residuos de aluminio con polvos cerámicos (SiC y WC).

Formulas utilizadas:

$$W = \rho * V \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

$W = \text{Masa de la sustancia [g]}$

$\rho = \text{Densidad de la sustancia } \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$

$V = \text{Volumen de la sustancia [cm}^3]$

$$2 \times 0.5 \times 0.25 \text{ [in]} = 5.08 \times 1.27 \times 0.635 \text{ [cm]} \quad \text{dimensiones de la probeta}$$

$$5.08 \times 1.27 \times 0.635 = 4.097 \text{ [cm}^3] \quad \text{volumen de la probeta}$$

Utilizando la fórmula 1, procedemos a obtener las cantidades de los residuos y polvos cerámicos a utilizar.

$$W_m = \rho_m * V = 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 4.097 \text{ cm}^3 * 0.95 = 10.51 \text{ g de residuo de Al requerido}$$

$$W_r = \rho_r * V = 3.21 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 4.097 \text{ cm}^3 * 0.05 = 0.66 \text{ g de partículas de SiC requeridas}$$

$$W_r = \rho_r * V = 15.63 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 4.097 \text{ cm}^3 * 0.05 = 3.2 \text{ g de partículas de WC requeridas}$$

Anexo B. Diseño factorial.

Los procesos de fabricación de materiales compuestos llegan a tener cierta complejidad, ya que en todos los métodos de fabricación existe una gran cantidad de variables a estudiar. En el caso de pulvimetalurgia, este es un proceso con diferentes etapas, que a su vez conllevan diferentes variables, algunas de las más importantes son de manera general, la cantidad de refuerzo a implementar, las formas y tiempos de mezclado de polvos, la temperatura y tiempo de sinterización, entre muchas más. Una forma de simplificar el manejo de dichas variables es implementar un diseño experimental, mismo que en el presente trabajo es un diseño factorial.

Un diseño factorial es un método de experimentación, donde se implementan todas las combinaciones posibles de las variables estudiadas, con el fin de obtener que efecto tienen sobre una respuesta, además de descubrir su interacción entre ellas. [Joan Ferré (2018). “EL DISEÑO FACTORIAL COMPLETO 2²”. Recuperado el 18 de septiembre de 2022 de: <http://www.quimica.urv.es/quimio/general/disfact.pdf>]

- Descripción del diseño factorial implementado.

En el presente trabajo se empleó un modelo 2^k, siendo k el número de variables a considerar. A su vez, se consideraron dos niveles, alto (+) y bajo (-), además de un punto central y sus réplicas.

- Valores y factores de los niveles empleados.

Las variables estudiadas en el presente trabajo son:

- Tiempo de mezclado
- Temperatura de sinterizado
- Tiempo de sinterizado

El diseño factorial consta de un punto central, 8 corridas experimentales y las respectivas réplicas.

$$P.C. = 1$$

$$2^k = 2^3 = 8$$

Tabla 2. Diseño factorial del experimento para compósitos 6061/SiC _P o 6061/WC _P .						
No. de muestra	X ₁		X ₂		X ₃	
1	t ₁	(-)	T ₁	(-)	t ₅	(-)
2	t ₁	(-)	T ₁	(-)	t ₆	(+)
3	t ₁	(-)	T ₃	(+)	t ₅	(-)
4	t ₁	(-)	T ₃	(+)	t ₆	(+)
5	t ₂	P.C.	T ₂	P.C.	t ₇	P.C.
6	t ₃	(+)	T ₁	(.)	t ₅	(-)
7	t ₃	(+)	T ₁	(-)	t ₆	(+)
8	t ₃	(+)	T ₃	(+)	t ₅	(-)
9	t ₃	(+)	T ₃	(+)	t ₆	(+)

donde:

X₁ = tiempo de mezclado (15, 30 y 45 min)

X₂ = temperatura de sinterizado (530, 550 y 580°C)

X₃ = tiempo de sinterizado (1 h, 2 h y 90 min)

(+) = nivel alto del factor

(-) = nivel bajo del factor

P.C. = punto central

Por lo tanto, el diseño factorial consta de 27 corridas experimentales en total, donde 24 tienen la finalidad de denotar la variación de los factores en los niveles bajo y alto, y tres son para observar el efecto del punto central.